

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GUILHERME D'OREY GAIVÃO PORTELLA

TAXA DE DEGRADAÇÃO DE ESTRUTURAS METÁLICAS E
DE CONCRETO EM AMBIENTES LITORÂNEOS DO SUL E
DO NORDESTE DO BRASIL: ESTUDOS DE CASO EM
PONTAL DO PARANÁ, PR E SALVADOR, BA

PONTAL DO PARANÁ
2011

GUILHERME D'OREY GAIVÃO PORTELLA

TAXA DE DEGRADAÇÃO DE ESTRUTURAS METÁLICAS E
DE CONCRETO EM AMBIENTES LITORÂNEOS DO SUL E
DO NORDESTE DO BRASIL: ESTUDOS DE CASO EM
PONTAL DO PARANÁ, PR E SALVADOR, BA

Monografia apresentada como requisito
parcial à conclusão do Curso de
Oceanografia, Setor de Ciências da
Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Prof^a Eunice Machado

PONTAL DO PARANÁ
2011

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	5
3. REVISÃO DA LITERATURA	6
3.1. CORROSÃO	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
3.1.1. <i>Tipos de Corrosão</i>	Erro! Indicador não definido.
3.1.2. <i>Passivação dos Metais</i>	9
3.2. CORROSÃO ATMOSFÉRICA	9
3.2.1. <i>O ar atmosférico e sua influência sobre os materiais</i>	10
3.2.2. <i>Classificação de Corrosividade Atmosférica</i>	11
3.2.3. <i>Mecanismo do processo de corrosão atmosférica</i>	19
3.3. A CORROSÃO DE ESTRUTURAS METÁLICAS	27
3.3.1. <i>Corrosão atmosférica do aço carbono</i>	27
3.3.2. <i>Corrosão atmosférica do aço galvanizado</i>	28
3.3.3. <i>Corrosão atmosférica do cobre</i>	29
3.3.4. <i>Corrosão atmosférica do alumínio</i>	30
3.4. A CORROSÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO	30
4. EXPERIMENTAL	36
4.1. ESTAÇÕES DE INTEMPERISMO NATURAL, ECA'S	36
4.2. DETERMINAÇÃO DOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS	38
4.3. CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA E LEVANTAMENTO DE DADOS METEOROLÓGICOS	39
4.4. TÉCNICA DOS POTENCIAIS DE CORROSÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO	40
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
5.1. CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA E DADOS METEOROLÓGICOS	43
5.2. MONITORAMENTO DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS	50
5.2.1. <i>Teor de Cloretos</i>	50
5.2.2. <i>Teor de Sulfatos</i>	53
5.3. ENSAIOS DE INTEMPERISMO NATURAL	56
5.3.1. <i>Alumínio</i>	56
5.3.2. <i>Cobre</i>	58
5.3.3. <i>Aço Carbono</i>	59
5.3.4. <i>Aço Galvanizado</i>	61
5.4. AVALIAÇÃO DOS POTENCIAIS DE CORROSÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO	65
6. CONCLUSÕES	69
7. TRABALHOS FUTUROS	71
8. REFERÊNCIAS	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Categorias de Corrosividade Atmosférica (ABNT NBR 14643, 2001).....	11
Tabela 2.	Índices de deterioração de Brooks.....	12
Tabela 3.	Classificação da categoria de corrosividade atmosférica em função de tempo de superfície úmida (t), teor de SO ₂ (A) e teor de cloretos (B) na atmosfera (ABNT NBR 14643, 2001).....	16
Tabela 4.	Categorias de corrosividade estimadas da atmosfera sobre metais padrão (ABNT NBR 14643, 2001).....	16
Tabela 5.	Categorias de corrosividade atmosférica segundo dados obtidos no primeiro ano de exposição (ISO 9223, 1992).....	17
Tabela 6.	Classificação do ambiente corrosivo segundo Liesegang (KENNY <i>et al.</i> , 1993).....	17
Tabela 7.	Composição química elementar da água do mar, em quantidades médias aproximadas (ASTM 1141, 1990).....	26
Tabela 8.	Classes de Agressividade Ambiental para estruturas de concreto, conforme a norma da ABNT NBR 6118:2007.	32
Tabela 9.	Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para $\Delta c=10$ mm (NBR 6118, 2007).	33
Tabela 10.	Soluções utilizados no preparo e limpeza dos corpos de prova metálicos antes de serem expostos nas ECA's.	37
Tabela 11.	Composição química elementar presentes nos metais padrão.	37
Tabela 12.	Valores médios, máximos e mínimos dos íons cloreto, em mg/m ² .dia, acompanhado da classificação do ambiente, segundo Liesegang.	53
Tabela 13.	Valores médios, máximos e mínimos da concentração de dióxido de enxofre (SO ₂), em mg/m ² .dia, acompanhado da classificação do ambiente, segundo Liesegang.	55
Tabela 14.	Taxa de corrosão e categoria de corrosividade atmosférica para o alumínio nas duas regiões.	57
Tabela 15.	Taxa de corrosão e categoria de corrosividade atmosférica para o Cobre nas duas regiões.	58
Tabela 16.	Taxa de corrosão e categoria de corrosividade atmosférica para o Aço Carbono nas duas regiões.	61
Tabela 17.	Taxa de corrosão e categoria de corrosividade atmosférica para o Aço Galvanizado nas duas regiões.	62
Tabela 18.	Taxas de corrosão observadas e estimadas, de acordo com as normas técnicas, para os metais-padrão.	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Processo de degradação dos metais, denominado “Ciclo dos Metais” (SICA, 2006).	6
Figura 2. Classificação climática de Köppen	14
Figura 3. Classificação climática de A. Strahler (SICA, 2006).	15
Figura 4. Variáveis do processo de corrosão atmosférica (SICA, 2006).	20
Figura 5. Efeito da distância da fonte sobre a velocidade de corrosão (VERGÉS, 2005).	27
Figura 6. Esquema da corrosão da armadura do concreto, mostrando a difusão de O_2 através do cobrimento do material (JOUKOSKI, 2003).	34
Figura 7. Moldagem das cruzetas na indústria de concreto pré moldado.	41
Figura 8. Temperaturas do ar médias, máximas e mínimas mensais na região de Pontal do Sul.	43
Figura 9. Precipitação acumulada, em mm, comparada com a umidade relativa média mensal, em porcentagem, no litoral paranaense.	44
Figura 10. Umidade relativa do ar média, máxima e mínima mensais, em porcentagem, no balneário de Pontal do Sul.	45
Figura 11. Umidade relativa do ar média, em porcentagem comparada com a radiação solar média, em W/m^2 , no litoral do Paraná.	45
Figura 12. Mapa de Corrosividade de Brooks (SICA, 2006).	46
Figura 13. Temperaturas médias do ar para as regiões de Sauípe e Pontal do Sul, em $^{\circ}C$.	47
Figura 14. Precipitação acumulada mensal, em mm, e a umidade relativa média, em porcentagem, para a região de Salvador - BA.	47
Figura 15. Precipitação acumulada mensal, em mm, para as duas regiões estudadas.	48
Figura 16. Radiação solar média acumulada (MJ/m^2) de Salvador-BA referente ao período aproximado de setembro de 2008 à setembro de 2010 (BRAMBILLA, 2011).	49
Figura 17. Velocidade média dos ventos nas duas regiões estudadas.	50
Figura 18. Teor de cloretos, em mg/m^2 .dia, em comparação com a precipitação, em mm, na ECA de Pontal do Sul.	51
Figura 19. Teor de cloretos, em mg/m^2 .dia, em comparação com a precipitação, em mm, na ECA de Sauípe.	52
Figura 20. Teor de dióxido de enxofre, em mg/m^2 .dia, em comparação com a precipitação, em mm, na ECA de Sauípe.	54
Figura 21. Teor de dióxido de enxofre, em mg/m^2 .dia, em comparação com a precipitação, em mm, na ECA de Pontal do Sul.	55
Figura 22. Comparação das taxas de corrosão do alumínio em função do tempo.	57
Figura 23. Comparação das taxas de corrosão do Cobre em função do tempo.	59
Figura 24. Comparação das taxas de corrosão do Aço Carbono em função do tempo.	60
Figura 25. Comparação das taxas de corrosão do aço galvanizado em função do tempo.	63
Figura 26. Comparação entre taxas médias de corrosão dos metais-padrão para as duas estações de intemperismo natural, após um ano de exposição.	65
Figura 27. Potencial de corrosão dos CP's instalados na ECA de Pontal do Sul, no período de agosto de 2008 a agosto de 2009.	66
Figura 28. Potencial de corrosão dos CP's instalados na ECA de Sauípe, no período de agosto de 2008 a agosto de 2009.	67
Figura 29. Potencial de corrosão de um CP padrão de concreto referência, instalado na ECA de Pontal do Sul, no período de agosto de 2008 a agosto de 2009.	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SE	Subestação de energia elétrica
RD	Rede de distribuição
Cn	Categoria de corrosividade ambiental
t	Tempo de superfície úmida
B	Taxa de cloreto
A	Taxa de sulfatação
RMS	Região metropolitana de Salvador
Id	Índice de deterioração de Brooks
P	Perda de espessura média
ECA	Estação de corrosão atmosférica

AGRADECIMENTOS

Um agradecimento especial à minha mãe, Margarida, pelas cobranças e ensinamentos, que foram muito importantes nessa caminhada. Foram momentos maravilhosos e inesquecíveis que vivemos juntos, e um aprendizado que guardo no coração.

Ao meu pai, Kleber, pelo tempo dedicado e pela viabilização do projeto. Sem o seu apoio, tudo teria se tornado muito mais complicado na elaboração e execução da proposta.

Agradeço à toda família, principalmente minha irmã, Mariana, ao meu Tio Pedro, e aos meus avós, Nhé, Maita e Wildy, por estarem sempre juntos, tanto nos momentos bons quanto nos momentos difíceis, sempre com carinho e dedicação e principalmente, pelo exemplo de vida.

A Professora Eunice, pela disponibilidade e compreensão durante esses anos de universidade, pelos conselhos e ensinamentos acadêmicos. Um agradecimento também aos membros da banca, professor Sérgio Henke e ao amigo Fabian de Sá, pelas críticas construtivas, que sempre são muito importantes para o crescimento como pessoa e também como profissional.

A todos os colegas do Lactec, que me ajudaram muito no desenvolvimento do projeto, principalmente a Kelly, que nunca faltou com a atenção e muito me ensinou sobre este projeto, e também ao orientador Guilherme da Cunha, por acreditar no meu potencial. Aos pesquisadores Alex e Paulo, com quem aprendi bastante sobre a degradação de estruturas de concreto e também aos colegas da Coelba, Cabussú, Cerqueira e Rogério Salles, pela oportunidade. Agradeço também a Príncia, Dásio e Paulinho, pelos aprendizados, bem como Rodrigo, César e Divonzir que ajudaram nos trabalhos na Estação de Corrosão de Pontal.

E já que família é quem você escolhe para viver, não precisa ter cota sangüínea, só um pouco mais de sintonia, um agradecimento mais que especial à família pontalense que se formou ao longo dessa caminhada. Carica, Mineiro, Daniboy, Bocão, Chinaldo, Mayu, Tuan, Thiaguera, Gringão, Queiroz, Samuca, Coala, Pira, Ana, Lari, Fabi, Aninha, Evandro, Bode e Cuesta essa caminhada não teria sido tão divertida sem vocês.

A toda turma GRR2007 e a todos os amigos que ajudaram nesses cinco anos muito divertidos. Aos amigos de Curitiba, com quem pude compartilhar várias histórias.

Um agradecimento a todos os professores e funcionários do CEM, que foram muito importantes nesses cinco anos, tanto com aprendizados quanto pela convivência.

Este projeto de pesquisa não teria sido realizado sem a participação direta e indireta de diversos profissionais da CONCESSIONÁRIA, LACTEC, da AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, CNPq, processo PIBITI e das próprias empresas relacionadas.

LISTA DE PRODUÇÃO TÉCNICA E CIENTÍFICA

PORTELLA, G. D. G.; Portella, K. F.; Brambilla, K. J. C.; Silva, G. C. de; Cabussú, M. S.; Guimarães, P. V.; Cerqueira, D. P.; SALLES, R. N.; Pereira, P. A. M. Desempenho quanto a Corrosão de Materiais Metálicos instalados nas regiões de Sauípe-BA e de Pontal do Sul-PR. XIV Congresso Latino-Americano de Ciências do Mar, Camboriú, SC, 2011.

PORTELLA, G. D. G.; Brambilla, K. J. C.; Portella, K. F.; Silva, G. C. de; Joukoski, A.; M. S. Cabussú; D. P. Cerqueira; R. N. Salles. Corrosividade Ambiental e Degradação de Materiais Metálicos em Duas Regiões do Brasil: Sauípe-BA e Pontal do Sul-PR. 2010. IV Seminário Anual de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação, LACTEC, Curitiba, PR, 2010.

PORTELLA, G. D. G.; Silva, G. C. de. Taxa de Degradação de Estruturas em Função da Salinidade no Sul e no Nordeste do Brasil: Estudos de Caso no Litoral Paranaense e em Salvador-BA. IV Congresso Brasileiro de Oceanografia, Rio Grande do Sul, 2010.

PORTELLA, G. D. G.; Silva, G. C. de. Taxa de Degradação de Estruturas Metálicas e de Concreto em Ambientes do Sul e do Nordeste do Brasil: estudos de caso em Pontal do Paraná, PR e Salvador, BA. V Seminário Anual de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação, LACTEC, Curitiba, PR, 163, 170, 2011.

PORTELLA, G. D. G.; Brambilla, K. J. C.; Portella, K. F.; Silva, G. C. de; Joukoski, A.; M. S. Cabussú; D. P. Cerqueira; R. N. Salles. Estudo da agressividade ambiental sobre materiais metálicos e estruturas de concreto armado do setor elétrico nas regiões nordeste e sul do Brasil, 2012. (artigo a ser submetido).

RESUMO

O acompanhamento dos parâmetros meteorológicos, tais como a umidade relativa, a temperatura do ar, a precipitação, a velocidade e direção dos ventos e a radiação solar, e dos teores de poluentes atmosféricos, aliados às taxas de corrosão dos metais-padrão (alumínio, cobre, aço carbono e aço galvanizado) permitem classificar o grau de corrosividade ambiental de uma região, também chamada de corrosividade atmosférica, “C”. A extensão do litoral brasileiro faz com que gastos no setor elétrico e nos demais setores da indústria com a degradação de materiais sejam altos, e que, geralmente podiam ser menores com a utilização de tecnologias adequadas. De acordo com o Índice de Brooks, toda a costa brasileira apresenta uma degradação moderada, mas não são consideradas as diferenças climáticas existentes. No nordeste e no sul do país, o clima é dominado por diferentes massas de ar, sendo que o primeiro tem maior influência das massas tropicais e equatoriais enquanto que a outra região é constantemente atingida por frentes polares. Nesta pesquisa está apresentado um estudo comparativo entre as duas regiões com características climáticas diferentes, que é o caso do balneário de Pontal do Sul, situado no litoral do Paraná, e a região de costa do Sauípe, localizado na região metropolitana de Salvador, no estado da Bahia. Para tanto, foram instaladas duas estações de corrosão atmosférica (ECA's) e expostos corpos de prova (CP's) dos metais-padrão, comumente utilizados em linhas de transmissão e redes de distribuição de energia elétrica, e de concreto armado, a fim de testar diferentes aditivos, como sílica ativa, metacaulin, borracha de pneu e fibras proliméricas, para avaliar tanto de forma quantitativa como qualitativa a agressividade dos meios frente à corrosão da atmosfera, em um período aproximado de um ano. Durante essa exposição ao intemperismo natural, houve o acompanhamento mensal dos teores de cloreto e sulfato, bem como dos dados meteorológicos, a fim de se obter diferentes subsídios para classificação da corrosividade atmosférica. A ECA de Pontal do Sul foi classificada como atmosfera rural, categoria mais baixa de agressividade (C₁), baseando-se no tempo de superfície úmida e na concentração dos poluentes enquanto Sauípe foi descrita como atmosfera marinha (C₄), considerada alta. Porém, para as taxas médias de corrosão dos metais, após um ano de exposição, apenas o cobre degradou mais no litoral baiano. O material mais adequado para essa região

foi o alumínio, seguido do aço galvanizado. Já, no litoral paranaense, o cobre degradou menos que os demais, em média. Os dois locais apresentaram na maior parte do tempo ventos provenientes do oceano, que são ricos em íons cloreto, e umidade relativa média anual acima de 80%, dois fatores que causam aumentos significativos nas velocidades cinéticas de corrosão. A temperatura média anual na região de Sauípe foi de 25 °C e em Pontal foi de, aproximadamente, 22 °C. A partir de normas técnicas foi analisada a corrosividade estimada (ISO 9223) e a observada (NBR 14643), e apenas o alumínio na Bahia se comportou de acordo com o esperado. No Paraná, todos os metais tiveram corrosividade alta (C₄) ou muito alta (C₅). Tal fato pode ser relacionado com a limpeza química realizada antes da exposição dos CP's, que remove os produtos de corrosão, responsáveis, geralmente, pela formação de uma camada passivadora na superfície do material. Aços carbono e galvanizado em Sauípe não degradaram tanto quanto indicavam os teores de poluentes e o tempo de superfície úmida. Com relação às cruzetas de concreto armado, foi utilizada uma técnica eletroquímica, chamada de levantamento dos potenciais de corrosão, que permitiu analisá-las qualitativamente. Em cerca de um ano e meio de verificações, nenhum dos 10 CP's de cada ECA apresentou valores acima da região considerada na ASTM C 876, 1999, como de baixa ou nenhuma probabilidade de corrosão, não podendo, assim, neste intervalo de tempo de medidas, definir quais dos aditivos foram capazes de aumentar a vida útil das estruturas.

ABSTRACT

The monitoring of meteorological parameters, such as relative humidity, air temperature, precipitation, wind direction and speed and solar radiation, and the levels of air pollutants, coupled with the corrosion rates of standard metals (aluminum, copper, carbon steel and galvanized steel) allow to classify the degree of corrosive environment of a region, also called the atmospheric corrosivity (C). The extent of the Brazilian coastline makes expenditures in the electricity sector and other sectors of industry with the deterioration of materials are high, and it generally could be lower with the use of appropriate technologies. According to the Index of Brooks, the entire Brazilian coast presents a moderate degradation, but the differences are not considered existing climate. In the Northeast and the South, the climate is dominated by different air masses, while the former has more influence masses of tropical and equatorial region while the other is constantly hit by polar fronts. This research is presented a comparative study between the two regions with different climatic characteristics, that is the case with the Pontal do Sul, located on the coast of Parana, and region of Costa do Sauípe, located in the metropolitan region of Salvador, state of Bahia. For this, we installed two stations atmospheric corrosion (ECAs) and exposed specimens (CPs) of the metals standard, commonly used in transmission lines and distribution networks, and reinforced concrete in order to test different additives such as silica fume, metakaolin, tire rubber and polymeric fibers, in order to assess both quantitative and qualitative means of aggression against corrosion from the atmosphere in a period of approximately one year. During this exposure to natural weathering, there was the monthly monitoring of the levels of chloride and sulfate, as well as meteorological data, in order to obtain subsidies for different classification of atmospheric corrosivity. The ECA Pontal do Sul was classified as rural atmosphere, the lowest category of aggressiveness (C_1), based on the wet surface time and concentration of pollutants while Sauípe was described as marine atmosphere (C_4), considered high. But for the average rates of corrosion of metals, after a year of exposure, only copper the most degraded in the Bahia coast. The most suitable material for this region was the aluminum, followed by galvanized steel. Already, on the coast of Parana, copper degraded less than the other, on average. The two sites showed most of the time from the ocean winds, which are rich

in chloride ions, and annual relative humidity above 80%, two factors that cause significant increases in speed kinetics of corrosion. The average annual temperature in the region of Sauípe was 25 °C and Pontal do Sul was approximately 22 °C. From technical standards was analyzed to estimate corrosivity (ISO 9223) and observed (NBR 14643), and only aluminum in Bahia behaved as expected. In Parana, all metals have high corrosivity (C₄) or very high (C₅). This may be related to the chemical cleaning performed before the exposure of CP's, which removes the corrosion products, responsible, generally, the formation of a passive layer on the surface of the material. Carbon steel and galvanized in Sauípe not degraded as indicated by the levels of pollutants and the time of the wet surface. With respect to concrete structures, was used an electrochemical technique, called the survey of potential corrosion, which allowed them to analyze qualitatively. In about a year and a half of checks, none of the 10 CPs each ECA had values above the region considered in the ASTM C 876 to have low or no likelihood of corrosion and can not, so in a time interval measurements, determine which of the additives were able to extend the life of structures.

1 INTRODUÇÃO

Assim como a maior parte das áreas coloniais americanas, os primeiros núcleos de povoamento no Brasil foram estabelecidos nas zonas litorâneas, já que a colonização das novas terras se deu por vias marítimas. A expansão mercantilista européia dependia muito de centros portuários pioneiros, que eram os elos entre os fluxos de matéria prima terrestres e marítimas. No fim do período colonial, observou-se na zona costeira do Brasil algumas cidades portuárias relativamente isoladas, constituídas por centros de produção local ou em pontos terminais de sistemas produtivos específicos do interior. Fora os grandes centros formados com esses intuitos, que é o caso de Rio de Janeiro, Salvador, Recife e São Luís, por exemplo, vastas extensões do litoral continuavam permanecendo isoladas e muito pouco ocupadas. A construção de linhas ferroviárias no início do século XX fez com que fossem minimizadas as vantagens localizacionais da zona costeira para a instalação industrial, que passou a avaliar outros fatores, principalmente a proximidade de fontes energéticas e/ou de matéria prima, iniciando-se uma etapa de urbanização voltada ao interior, cujo maior exemplo é o crescimento urbano observado na metrópole paulistana. Na primeira metade deste século, observou-se um grande número de “cidades mortas” existindo na orla litorânea brasileira, que vão constituir-se nas zonas de assédio do surto da ocupação da zona costeira, que vai ocorrer na sua segunda metade. Vários processos atuaram na urbanização da região costeira a partir dos anos 50, impulsionados por diferentes atores sociais. Analisando o perfil atual, é possível observar um apelo costeiro da localização populacional do Brasil, já que, com exceção dos estados fronteiriços, em todos os outros a ocupação do litoral é sensivelmente superior à média estadual. Hoje em dia, a zona costeira acolhe cinco das nove maiores regiões metropolitanas brasileiras (Fortaleza, Rio de Janeiro, Salvador, Belém e Recife) (MORAES, 2007).

A atmosfera litorânea é extremamente agressiva para os materiais de engenharia, idéia que pode ser confirmada pelo grande número de publicações científicas relacionadas aos ensaios de corrosão utilizando diferentes materiais e prolongados períodos de exposição, nos mais diferentes países (CASTAÑO *et al.*, 2010; KATAYAMA, *et al.*, 2005; LAN *et al.*, 2006; MORALES *et al.*, 2005; NATESAN *et al.*, 2006; NUNEZ *et al.*, 2005; RODRÍGUEZ *et al.*, 2002; VERA *et al.*, 2008;

YUANTAI *et al.*, 2010). Em decorrência do custo elevado das perdas de corrosão atmosférica, equivalente a cerca de metade do custo total, foi desenvolvido o projeto “Mapa Ibero-Americano de Corrosividade Atmosférica”, com o objetivo de caracterizar e classificar a corrosividade atmosférica de diversas estações de ensaio distribuídas pelos países da comunidade ibero-americana (GENTIL, 2003).

Estudos globais têm mostrado que o total de gastos com problemas relacionados à degradação de materiais chega a 5% do Produto Nacional Bruto, e que destes, cerca de 20 a 25% dos custos poderiam ser evitados se fossem usadas as tecnologias de controle apropriadas (YUANTAI *et al.*, 2010). No Brasil, estima-se que sejam da ordem de US\$ 15 bilhões ao ano os gastos relativos aos processos corrosivos, sendo que cerca de US\$ 5 bilhões poderiam ser economizados mediante o uso de métodos de prevenção e controle (BRAMBILLA, 2011).

Os problemas de corrosão são frequentes e ocorrem nas mais variadas atividades, como por exemplo, na indústria química, petrolífera, petroquímica, naval, de construção civil, automobilística, nos meios de transporte aéreo, ferroviário, metroviário, marítimo, rodoviário e nos meios de comunicação, como sistemas de telecomunicações (restaurações metálicas), na medicina e em obras de arte como monumentos e esculturas (GENTIL, 2003). As perdas econômicas que atingem essas atividades podem ser diretas ou indiretas. A corrosão atmosférica pode causar severos danos às estruturas metálicas e equipamentos. Os efeitos são tão significativos que os gastos com corrosão atmosférica na China são de, aproximadamente, metade do total de custos anuais com todos os tipos de corrosão de materiais (DONG *et al.*, 2007).

Nas últimas décadas, pesquisas com corrosão atmosférica foram dominadas, principalmente, por testes de campo, onde se comparam a resistência de diferentes materiais, a sua taxa de corrosividade em diferentes ambientes, e as suas correlações empíricas com os parâmetros meteorológicos. Não se recomenda estudar a corrosão atmosférica sem o estudo preliminar dos aspectos meteorológicos e ambientais que interferem sobre a mesma. Os contaminantes têm proporções variáveis, que vão depender da proximidade das fontes emissoras e das condições locais e, em locais de alto teor de partículas em suspensão, os ventos agem como agente veiculador de degradação por erosão (PORTELLA *et al.*, 2006).

O estudo das variáveis que influenciam na degradação dos materiais é relevante, já que estes se encontram presentes no cotidiano, estando susceptíveis ao processo de corrosão. A realização do mapeamento ambiental vai auxiliar no estudo dos materiais metálicos utilizados nas linhas de distribuição e de transmissão de energia elétrica, bem como de comunicação de dados, tais como: cabos, torres, linhas telefônicas, acessórios de rede, etc.

Assim como os materiais metálicos, as estruturas de concreto armado também são degradadas em ambientes similares. A armadura metálica contida no seu interior é, normalmente, atingida por sais provenientes do ambiente de sua exposição em tempos mais longos do que aqueles considerados para os metais sem proteção superficial, mas, degradam ou oxidam e causam prejuízos de grande monta à sociedade. O processo de deterioração neste tipo de estrutura depende, principalmente, dos insumos, do tipo e quantidade de cimento na dosagem, da relação água/cimento, sendo maior para maiores concentrações de água, pela probabilidade de aumento de porosidade do concreto resultante, da espessura de concreto que recobre a armadura, do modo de fabricação, do tempo de superfície úmida e dos poluentes externos (NEVILLE, 1997).

Neste projeto de pesquisa propõe-se o estudo da taxa de corrosão pela exposição de materiais em campo. Para tanto, diferentes corpos de prova (CP's) de 4 metais bastante utilizados em redes de distribuição de energia (cobre, aço carbono, aço galvanizado e alumínio) e, também, de concreto, foram analisados em dois ambientes litorâneos do Brasil. Um situado no nordeste brasileiro, em Salvador, na região da Costa do Sauípe, no estado da Bahia e, o outro, na região sul, no balneário Pontal do Sul, no município de Pontal do Paraná, pertencente ao litoral do Paraná.

A corrosividade ambiental em uma determinada localidade é um fator importante para usos gerais na engenharia, auxiliando na escolha dos materiais mais duráveis e as proteções mais adequadas. Modelos para prever os danos gerados pela corrosão de metais na atmosfera são extremamente úteis para inferir sobre a durabilidade das estruturas metálicas, determinando os custos dos danos com a degradação dos materiais e adquirindo conhecimento sobre os efeitos das variáveis ambientais nas velocidades cinéticas de corrosão (NATESAN *et al.*, 2006).

Para o aço carbono, um grande número de estudos foi realizado ligando a sua taxa de corrosão com as concentrações de sulfato, mas poucos estudos relacionam estas taxas a concentração de íons cloreto, que são os principais poluentes investigados no projeto, pelas características dos ambientes estudados (RODRÍGUEZ *et al.*, 2002). Esta pesquisa também poderá ajudar a esclarecer o efeito de períodos secos e úmidos no processo de corrosão atmosférica (KATAYAMA *et al.*, 2005).

Sendo o cobre um dos materiais mais utilizados pela sociedade humana em redes de distribuição elétrica, na indústria eletrônica, em redes de comunicação, entre outros, os estudos a respeito de seus compostos em relação à corrosão atmosférica têm sido muito comuns no último século (NUNEZ *et al.*, 2005).

Já, o aço galvanizado, tem seu emprego na proteção de estruturas metálicas de grande porte do setor elétrico, dentre outros, tais como as torres de linhas de transmissão, postes de iluminação e luminárias destas redes. O alumínio, por sua vez, vem sendo empregado em substituição ao metal cobre, de alto poder comercial, pelo motivo de roubo, vandalismo, risco de morte e alta demanda de manutenção.

O concreto, pelo seu custo e tempo de vida útil elevado, veio ao longo do século atendendo grande parte do setor, sendo utilizado em postes, contrapostes, placas de estai e cruzetas, bem como na maioria das edificações.

2 OBJETIVOS

O presente projeto foi realizado no Programa Institucional de Bolsas de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação do LACTEC. Para a elaboração desta pesquisa, foram confeccionados e expostos materiais metálicos e estruturas de concreto do setor elétrico, em um projeto de Pesquisa & Desenvolvimento realizado na região metropolitana de Salvador-BA e em Pontal do Sul-PR, intitulado: “Mapeamento Ambiental para a determinação do grau de corrosividade e de degradação de materiais das redes aéreas de distribuição de energia elétrica com soluções corretivas” (COELBA P&D 0047-022/2007). Os dados foram monitorados durante o período de 2009 e 2010.

A instalação das estações de corrosão atmosférica no sul e nordeste do país, para o monitoramento de poluentes atmosféricos e exposição de corpos-de-prova padrões ao intemperismo natural serviram para a classificação e mapeamento da corrosividade atmosférica dos diferentes ambientes agressivos da atmosfera litorânea. Os objetivos da pesquisa foram, sendo o primeiro, o geral, e os demais, específicos:

- verificar o efeito regional dos aerossóis marinhos na atmosfera litorânea sobre determinados materiais da rede de distribuição elétrica;
- estudar técnicas não destrutivas de desempenho de estruturas de concreto armado pelo potencial de corrosão da armadura em meios agressivos, e avaliar a eficácia dos aditivos e dos resultados analíticos;
- complementar os estudos sobre a influência dos contaminantes atmosféricos aliados às condições meteorológicas, que influenciam diretamente no processo de corrosão atmosférica dos materiais; e
- estudar o desempenho do aço-carbono, alumínio, cobre e aço galvanizado, expostos nas estações de intemperismo natural e avaliar qual o material mais adequado para cada uma das regiões.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Neste Capítulo, estão sendo considerados pesquisas, normas e assuntos pertinentes ao processo de corrosão atmosférica, principalmente, relacionados ao ambiente litorâneo, por conter altas teores de cloreto, elevado tempo de superfície úmida e, por propiciar no Brasil, devido à sua grande extensão territorial na faixa considerada, redução de custos de substituição, manutenção e proteção dos materiais de engenharia.

3.1 CORROSÃO

A deterioração de materiais metálicos e não metálicos por ação química e/ou eletroquímica do meio ambiente é definido como corrosão (GENTIL, 2003). O processo é espontâneo e transforma constantemente os materiais. A interação físico-química entre o material e o seu meio operacional representa alterações e desgastes e, como consequência, modificações estruturais que afetam as suas durabilidades e seus desempenhos. É importante ressaltar que danos causados por fenômenos físicos não são considerados corrosão, e sim, abrasão, desgaste ou erosão (UHLIG, 1975 *apud* SICA, 2006).

Os metais tendem a retornar a sua condição de estabilidade e, sendo assim, o produto de corrosão de um metal vai ser bem semelhante ao minério do qual é originalmente extraído, obedecendo ao ciclo dos metais, conforme ilustrado na Figura 1 (GENTIL, 2003).

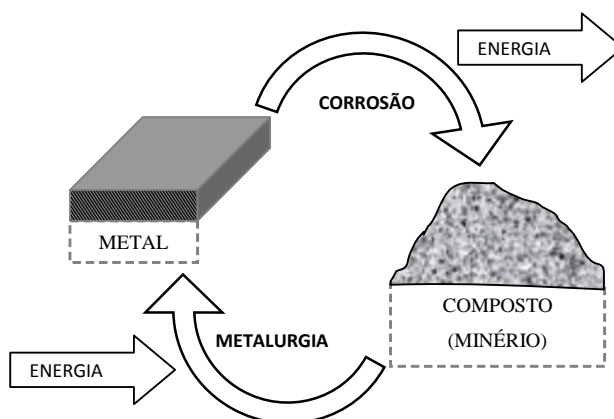


Figura 1. Processo de degradação dos metais, denominado “Ciclo dos Metais” (SICA, 2006).

Os processos de corrosão dos metais são representados por reação de oxidação e redução, sendo que o mesmo age como agente redutor cedendo elétrons que são recebidos pelo agente oxidante, que é uma substância existente no eletrólito ou ambiente propício para a corrosão. Neste caso, quanto menor for a condutividade do eletrólito mais alta será a resistência à corrosão. Partículas iônicas, como os cloretos e sulfatos, combinados com a umidade condensada iniciam a corrosão pela formação de pilhas galvânicas de aeração diferencial ou por que, devido a sua natureza higroscópica, formam eletrólitos sobre a superfície do metal (SICA, 2006).

As duas reações ou equações referenciadas na sequência vão ocorrer simultaneamente: a anódica ou de oxidação (Equação 1) e a catódica ou de redução (Equação 2):



Onde, (*M*) é um metal qualquer; (*e⁻*) é o número de elétrons; (*n*) um número inteiro que representa os elétrons cedidos pelo metal quando este se transforma em íons; e, (*X*) a substância receptora ou agente oxidante, sendo a reação catódica. O fenômeno da corrosão vai ser parte da reação de oxidação (anódica), que vai gerar íons metálicos em solução, dissolvendo o metal e transformando-o em outro composto. Para que o processo realmente prossiga, porém, tem de haver uma reação de redução (catódica), que vai consumir os elétrons liberados. Se isso não ocorrer, o processo cessa, quando a reação de oxidação atingir o equilíbrio. Um eletrólito é definido, assim, como um condutor iônico (solução) que na corrosão atmosférica é formado pela dissolução de contaminantes atmosféricos em suficientes monocamadas de água sobre ou ao redor do metal (SICA, 2006).

3.1.1 Tipos de Corrosão

Na sequência, estão apresentados os principais tipos de corrosão, podendo identificá-los visualmente, na maior parte das vezes, suas formas, causas e mecanismos (GENTIL, 2003):

- uniforme, que se processa em toda a extensão da superfície, ocorrendo perda generalizada da espessura;
- em placas, localizada em algumas regiões da superfície metálica e não em toda a sua extensão, formando placas com escavações;
- alveolar, que acontece na superfície metálica produzindo sulcos ou escavações semelhantes a alvéolos, apresentando fundo arredondado e profundidade geralmente menor que o seu diâmetro;
- puntiforme, que ocorre na forma pontual ou em pequenas áreas localizadas na superfície metálica, produzindo pites, que são cavidades que apresentam o fundo em forma angulosa e profundidade geralmente maior que o seu diâmetro;
- intergranular, que se processa entre os grãos da rede cristalina do material metálico, o qual perde suas propriedades mecânicas e pode fraturar quando solicitado por esforços mecânicos;
- intragranular, acontecendo no interior dos grãos da rede cristalina do material metálico, o qual, perdendo suas propriedades mecânicas, poderá fraturar a uma pequena solicitação mecânica;
- filiforme, acontecendo sob a forma de finos filamentos, que se propagam em diferentes direções e que não se cruzam;
- por esfoliação, na qual a corrosão se processa de forma paralela à superfície metálica. Ocorre em chapas ou componentes extrudados que tiverem seus grãos alongados e achatados. O produto da corrosão, volumoso, ocasiona a separação das camadas contidas entre as regiões que corroem;
- empolamento por hidrogênio, no qual o hidrogênio atômico penetra no material metálico e, como tem pequeno volume atômico, difunde-se rapidamente em regiões com descontinuidades (inclusões e vazios) e transforma-se em hidrogênio molecular, exercendo pressão e originando a formação de bolhas.

3.1.2 Passivação dos Metais

Nas reações anódicas, pode haver a formação de óxidos ou hidróxidos que vão agir na proteção do metal, dependendo da natureza do material e do meio em que esse se encontra exposto, conforme apresentado na Equação (3):



Esse processo de passivação é um fenômeno superficial e natural, sendo a reação entre as espécies metálicas e as substâncias contidas no meio, que formará uma fina película de óxido hidratado na superfície do material, denominada camada passiva, que ao separar os reagentes do eletrólito vai retardar a cinética do processo corrosivo. É um processo paralelo ao de dissolução do metal para formar cátions solúveis, que por sua vez vai formar produtos sólidos de corrosão, relacionados com a ação do microclima local (GENTIL, 2003).

Porém, essa camada passiva formada só vai proteger o material se os produtos forem compactos, aderentes e pouco solúveis (ou insolúveis). É comum, por exemplo, para o ferro, o alumínio, o cobre e o zinco, sendo dependente da agressividade do meio. A teoria da passividade foi descrita por Ramanathan *apud* Uhlig denominada “teoria da película do óxido” (SICA, 2006).

Essa camada passivadora, por sua vez, pode ser destruída principalmente em regiões litorâneas pela ação dos íons halogenetos, como é o caso do cloreto (Cl^-), ou outras substâncias redutoras, que vão penetrar nessa camada através de falhas (poros ou trincas) na película com mais facilidade que outros íons, causando o início da corrosão por fatores eletroquímicos, mecânicos ou químicos, com o aumento da permeabilidade da camada de óxido ou hidróxido (GENTIL, 2003).

3.2 CORROSÃO ATMOSFÉRICA

A corrosão atmosférica ocorre quando se forma uma película de eletrólito sobre a superfície dos materiais, principalmente, metálicos, ocasionando o ataque do tipo eletroquímico. Esta película é consequência da umidade e sua presença e ação no processo de degradação dependem, fundamentalmente, dos fatores: umidade relativa, substâncias poluentes (materiais particulados e gases), temperatura e tempo de sua permanência na superfície dos materiais (GENTIL, 2003).

Grande parte dos materiais metálicos e equipamentos estão expostos às agressividades do ambiente e suas condições físico-químicas e termodinâmicas, e estima-se que a metade das perdas globais por corrosão é consequência da degradação pela atmosfera. Isso faz com que o impacto ambiental seja grande, já que o processo de extração dos metais das reservas mundiais de minérios, que são recursos não renováveis, demandam recursos e, também, energia para repor os metais perdidos pela corrosão. É o caso do aço, que mesmo sendo uma das mais resistentes ligas metálicas já formuladas pelo homem, no qual um quinto da produção mundial é destinado para repor as perdas causadas pela sua degradação e, só nos EUA, representa 3% do PIB de todos os anos, um montante estimado de US\$ 400 bilhões (BRAMBILLA, 2011).

A cinética dos processos corrosivos da atmosfera não é facilmente identificada, haja vista a dificuldade de simular em laboratório as condições do meio. Por isso, ensaios de campo são largamente utilizados para descrever esse processo, como é o caso de diversos trabalhos citados no “Mapa Ibero Americano de Corrosividade Atmosférica” citado anteriormente (ARAUJO, 1994 *apud* GENTIL, 2003).

3.2.1 O ar atmosférico e sua influência sobre os materiais

O ar proveniente do oceano ao continente é rico em aerossóis resultantes da evaporação e do seu transporte mecânico pelos ventos. A concentração de íons presente no ar atmosférico é uma fonte de degradação por conter, normalmente, compostos de sulfato e de cloretos que são os agentes corrosivos mais comuns e importantes, como vêm sendo estudados por diferentes autores (MENDOZA, 2000).

Do total de sais das águas oceânicas, 7,68% são sulfatos, enquanto que, os cloretos representam 55,4%. Essa composição é similar à contida nos aerossóis marinhos, demonstrando a importância dos íons cloreto na degradação de materiais em regiões costeiras. A concentração desses na atmosfera depende de fatores como altitude, distância do mar, características orográficas e topográficas da região, velocidade e direção dos ventos, etc. (MORCILLO *et al.*, 2000).

Valores altos de cloreto são, normalmente, observados durante a passagem de ventos nas tempestades, por aumentarem a intensidade das ondas e levarem,

consequentemente, maiores quantidades de sais atmosféricos do que em regimes normais. Porém, o aumento na velocidade dos ventos também pode reduzir o grau de poluição, em função do arraste e limpeza das superfícies expostas (MORCILLO *et al.*, 2000).

3.2.2 Classificação de Corrosividade Atmosférica

Na norma ISO 9223 (ISO 9223, 1992) estão recomendados valores de alguns parâmetros ambientais, como tempo de superfície úmida (“time of wetness”), o teor de cloretos e de óxidos de enxofre (gerados pela poluição, principalmente, industrial e da queima de combustíveis fósseis) para classificar a agressividade do ambiente, também chamada corrosividade ambiental (ABNT NBR 14643, 2001). Na norma, por sua vez, não estão considerados fatores como precipitação, radiação solar e a ação dos ventos que influenciam diretamente na corrosão, por serem difíceis de generalizar e muito específicos para diferentes materiais. Esta norma, em conjunto com outras 3 (ISO 9224, 9225 e 9226) têm, também, o objetivo de fornecer guias padrões para classificar o grau de corrosividade da atmosfera frente aos materiais metálicos, como o aço carbono, o aço galvanizado, o zinco e o alumínio. A NBR 14643 (ABNT NBR 14643, 2001) é equivalente a estas e caracteriza a atmosfera em 5 categorias de corrosividade, podendo ser realizada a partir das taxas de corrosão obtidas no primeiro ano de exposição (Tabela 1).

Tabela 1. Categorias de Corrosividade Atmosférica (ABNT NBR 14643, 2001).

Categoria de Corrosividade	Agressividade
C₁	Muito baixa
C₂	Baixa
C₃	Média
C₄	Alta
C₅	Muito Alta

Brooks *apud* Morcillo *et al.* (MORCILLO *et al.* 2000) apresentaram um índice sobre o potencial de corrosão a partir de dados meteorológicos. O valor numérico

denominado índice de deterioração de Brooks (Id), representa o potencial de corrosão a partir de dados meteorológicos e é calculado a partir da pressão de saturação do vapor de água à temperatura e umidade relativa médias da região, conforme Equação (4).

$$Id = \frac{(UR - 65) \cdot P}{100} \quad (4)$$

Onde: (Id) é o índice de deterioração média anual de Brooks; (UR) é a umidade relativa média anual (em porcentagem); e (P) é a pressão de saturação do vapor de água na atmosfera (em mbar), correspondente à temperatura média anual; este valor pode ser obtido experimentalmente ou por meio de tabelas padrão (SICA, 2006).

De acordo com esse índice, foram estabelecidos diferentes graus de deterioração, conforme ilustrado na Tabela 2.

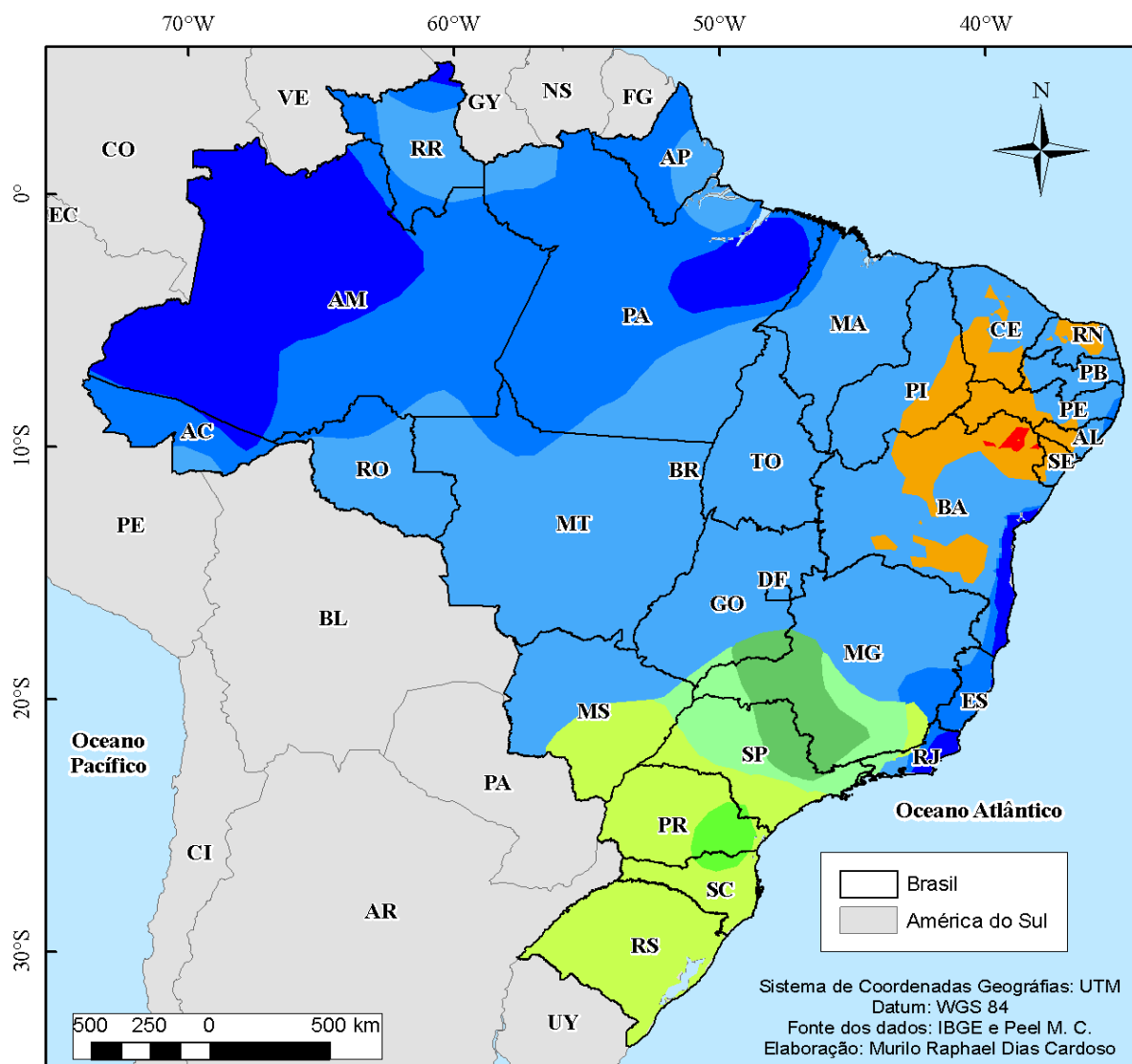
Tabela 2. Índices de deterioração de Brooks.

Id	Grau de Deterioração	Id	Agressividade
Id < 1	Muito baixo	0 – 1	Não agressivo
1 < Id < 2	Baixo	1 – 2	Muito pouco agressivo
2 < Id < 5	Moderado	2 – 4	Pouco agressivo
Id > 5	Alto	4 – 5	Agressivo
		5 – 10	Muito agressivo

O projeto MICAT, iniciado no Brasil em 1989, produziu dois mapas de agressividade distintos. Além do mapeamento seguindo o Id, foi elaborado um que tomou como base a ISO 129442, que considerou o tempo de umedecimento como principal variável, após a exposição de materiais em locais previamente determinados. Ambos os mapas servem para a representação visual do grau de corrosividade atmosférica para diferentes regiões. É uma importante ferramenta que

permite visualizar a amplitude da agressividade atmosférica para um determinado local e assim selecionar o material metálico que tem mais resistência a corrosão e é mais viável economicamente. Diversos países têm confeccionado mapas como estes, levando em consideração diferentes critérios, principalmente utilizando os metais padrão frente às normas estabelecidas e com base nas funções dose-resposta. Para criação destes mapas, porém, é necessária uma vasta rede experimental, que possui por sua vez altos custos de implantação. O sistema de informações geográficas (SIG) vem sendo bastante utilizado nesse sentido (BRAMBILLA, 2011).

Para a classificação climática das regiões foram utilizados além dos dados obtidos nas estações meteorológicas, os estudos e classificações de Köppen (Figura 2) e, como complemento, a de A. Strahler (SICA, 2006). A primeira se baseia na temperatura e pluviosidade média anual, existindo cinco tipos de clima no Brasil (Am – Equatorial; Aw – tropical; Bsh – semi-árido; Cwa – tropical de altitude; Cf – subtropical). Essa classificação também leva em consideração os principais sistemas dinâmicos da circulação atmosférica atuantes no país (massa equatorial atlântica e continental – mEa e mEc; massa tropical atlântica e continental – mTa e mTc e a massa polar atlântica – mPa).



Classificação Climática: Köppen

Af - Clima tropical úmido ou Clima Equatorial	Cfa - Clima temperado úmido com Verão quente
Am - Clima de monção	Cfb - Clima temperado úmido com Verão temperado
Aw - Clima Tropical com Estação seca no inverno	Cwa - Clima temperado úmido com Inverno seco e Verão quente
BSh - Clima das estepes quentes de baixa latitude e altitude	Cwb - Clima temperado úmido com Inverno seco e Verão temperado
BWh - Clima das regiões desérticas quentes de baixa latitude e altitude	

Figura 2. Classificação climática de Köppen

A classificação proposta por Strahler (Figura 3), por sua vez, delimita que os climas no Brasil são controlados por massas de ar equatoriais-tropicais e tropicais-polares, também dividindo a atmosfera em 5 tipos climáticos. São eles: clima equatorial úmido – convergência dos alísios; clima litoral úmido – influenciado pela mTa; clima tropical alternadamente úmido e seco; clima tropical semi-árido e clima subtropical úmido.



Figura 3. Classificação climática de A. Strahler (SICA, 2006).

A circulação atmosférica da costa sul do Brasil está relacionada com o anticiclone subtropical do Atlântico Sul. A dinâmica da região é regulada, principalmente, pelos fenômenos associados à passagem de frentes polares. Bigarella *et. al.* 1978 *apud* MUEHE, 2006, afirma que a dinâmica dos ventos é definida, basicamente, pelo Anticiclone do Atlântico Sul e pelo Anticiclone Migratório Polar, na sua ação sobre o Ramo Atlântico da Massa Polar.

A média da temperatura do ar na planície costeira paranaense anual estimada varia entre 20,8 °C e 22 °C (IPARDES, 1990). Segundo Oliveira, 1986, a distribuição de chuvas no sul do Brasil tem como principais responsáveis: a circulação atmosférica, os sistemas frontais, a posição latitudinal e as características fisiográficas. Já, as chuvas na região costeira do Paraná são precipitações do tipo ciclônico, orográfico e de convecção, e a média anual está em torno de 2500 mm (IPARDES, 1990).

A classificação de corrosividade atmosférica pode ser dada, também, a partir de 3 variáveis independentes: o tempo de superfície úmida e os teores de sulfato e cloreto (Tabelas 3 e 4).

Tabela 3. Classificação da categoria de corrosividade atmosférica em função de tempo de superfície úmida (t), teor de dióxido de enxofre (A) e teor de cloretos (B) na atmosfera (ABNT NBR 14643, 2001).

Categoria	(t) (h/ano)	SO₂ (A) (mg/m².dia)	Cl⁻ (B) (mg/m².dia)
t ₁ ; A ₀ ; B ₀	≤ 10	≤ 10	≤ 3
t ₂ ; A ₁ ; B ₁	10 – 250	10 – 35	3 – 60
t ₃ ; A ₂ ; B ₂	250 – 2500	35 – 80	60 – 300
t ₄ ; A ₃ ; B ₃	2500 – 5500	80 – 200	300 – 1500
t ₅	> 5500	> 200*	> 1500*

Nota: * valores estimados.

Tabela 4. Categorias de corrosividade estimadas da atmosfera sobre metais padrão (ABNT NBR 14643, 2001).

Aço-carbono															
	t ₁			t ₂			t ₃			t ₄			t ₅		
	B ₀ - B ₁	B ₂	B ₃	B ₀ - B ₁	B ₂	B ₃	B ₀ - B ₁	B ₂	B ₃	B ₀ - B ₁	B ₂	B ₃	B ₀ - B ₁	B ₂	B ₃
A ₀ - A ₁	1	1	1 - 2	1	2	3 - 4	2 - 3	3 - 4	4	3	4	5	3 - 4	5	5
A ₂	1	1	1 - 2	1 - 2	2 - 3	3 - 4	3 - 4	3 - 4	4 - 5	4	4	5	4 - 5	5	5
A ₃	1 - 2	1 - 2	2	2	3	4	4	4 - 5	5	5	5	5	5	5	5
Zinco e Cobre															
A ₀ - A ₁	1	1	1	1	1 - 2	3	3	3	3 - 4	3	4	5	3 - 4	5	5
A ₂	1	1	1 - 2	1 - 2	2	3	3	3 - 4	4	3 - 4	4	5	4 - 5	5	5
A ₃	1	1 - 2	2	2	3	3 - 4	3	3 - 4	4	4 - 5	5	5	5	5	5
Alumínio															
A ₀ - A ₁	1	2	2	1	2 - 3	4	3	3 - 4	5	3	3 - 4	5	4	5	5
A ₂	1	2	2 - 3	1 - 2	3 - 4	4	3	4	5	3 - 4	4	5	4 - 5	5	5
A ₃	1	2 - 3	3	3 - 4	4	4	3 - 4	5	5	4 - 5	5	5	5	5	5

Nota: a corrosividade está expressa como parte numérica do código de categoria de corrosividade (exemplo: 1 em vez de C₁).

A partir de ensaios de campo, como o realizado no presente projeto, é possível classificar o grau de corrosividade de uma atmosfera sobre os 4 metais padrão a partir das taxas de corrosão obtidas no primeiro ano de exposição, conforme demonstrado na Tabela 5.

Tabela 5. Categorias de corrosividade atmosférica segundo dados obtidos no primeiro ano de exposição (ISO 9223, 1992).

Categoria de Corrosividade	Unidades	Aço Carbono	Zinco	Cobre	Alumínio
C₁	g/m ² /ano	≤ 10	≤ 0,7	≤ 0,9	Desprezível
	µm/ano	≤ 1,3	≤ 0,1	≤ 0,1	-
C₂	g/m ² /ano	10 – 200	0,7 – 5	0,9 – 5	≤ 0,6
	µm/ano	1,3 – 25	0,1 – 0,7	0,1 – 0,6	-
C₃	g/m ² /ano	200 – 400	5 – 15	5 – 12	0,6 – 2
	µm/ano	25 – 50	0,7 – 2,1	0,6 – 1,3	-
C₄	g/m ² /ano	400 – 650	15 – 30	12 – 25	2 – 5
	µm/ano	50 – 80	2,1 – 4,2	1,3 – 2,8	-
C₅	g/m ² /ano	650 – 1500	30 – 60	25 – 50	5 – 10
	µm/ano	80 – 200	4,2 – 8,4	2,8 – 5,6	-

Outra classificação de corrosividade atmosférica foi elaborada por Liesegang, em 5 tipos de ambientes agressivos (Tabela 6).

Tabela 6. Classificação do ambiente corrosivo segundo Liesegang (KENNY et al., 1993).

Ambiente corrosivo	Contaminação atmosférica		
	SO₃	SO₂ – calculado	Cl⁻
	(mg/100cm².dia)	(mg/m².dia)	(mg/m².dia)
1. Rural	0,12 – 0,37	9,6 – 29,6	< 30
2. Urbano	0,37 - 1,25	29,6 – 100,0	< 30
3. Industrial	1,25 - 2,50	100,0 – 200,0	< 30
4. Marinho	0,12 - 0,37	9,6 – 29,6	30 – 3000
5. Marinho industrial	1,25 - 2,50	100,0 – 200,0	30 – 3000

Na atmosfera industrial, o principal íon degradante é o dióxido de enxofre (SO_2), resultante da queima de combustíveis fósseis, que reage com a umidade do ar e se deposita na superfície do metal na forma iônica ou de ácido sulfuroso. Já, a atmosfera marinha, como já citado, vai ser composta principalmente por partículas de cloreto de sódio (NaCl), carregadas pelos ventos e depositadas nas superfícies expostas (BRAMBILLA, 2011).

A atmosfera rural, normalmente, não contém contaminantes químicos agressivos (desconsiderando as regiões de alta aspersão de agrotóxicos e fertilizantes), e seus principais agentes degradantes vão ser o oxigênio e o gás carbônico. Nas regiões urbanas, observam-se elevadas taxas de corrosão quando aliadas à presença de uma alta umidade relativa, condensação, gás carbônico e íons de enxofre, que vão promover interações mais intensas dos contaminantes com as estruturas metálicas. Próximos às regiões portuárias, os ambientes marinho-industriais contêm altas concentrações de cloretos e, também, de compostos de enxofre, sendo locais de degradação acelerada dos materiais (BRAMBILLA, 2011).

Testes de corrosão fornecem fundamentos básicos para o seu controle e, também, para caracterizar a agressividade de um determinado meio corrosivo. Estes, podem ser realizados em laboratório ou em campo, sendo que, com cada qual, se atingem objetivos diferentes. Assim, por exemplo, os testes em campo são úteis para estudar a eficiência das medidas de proteção anticorrosiva e, também, para selecionar o material mais adequado para um determinado meio, estimando a sua durabilidade no ambiente selecionado. Sendo realizados sob condições extremamente semelhantes às de serviço, permitem uma melhor avaliação da ação deletérea sobre o material metálico, obtendo resultados significativos de sua resistência aos contaminantes ambientais (GENTIL, 2003).

No geral, no início da corrosão, a cinética depende somente da composição da atmosfera, independente da do material metálico. Porém, após a formação do produto, esta última, determina a velocidade com que este processo acontece. (GENTIL, 2003).

Modelos estatísticos baseados em funções dose-resposta fornecem equações de correlação, que possibilitam a predição da velocidade de degradação a partir dos parâmetros meteorológicos e os contaminantes atmosféricos, que influenciam diretamente no processo. Os modelos são baseados no tempo de superfície úmida,

teor de cloretos e sulfatos, mas outros autores (CORVO *et al.*, 2005) desenvolveram modelos que incorporam outras variáveis. Em seu modelo, a influência da precipitação é considerável na taxa de corrosão dos materiais principalmente em regiões costeiras, já que os íons cloretos são “lavados” da superfície do metal. A cinética do processo vai depender também do regime de chuvas. Altas umidades e muitas chuvas podem diminuir o efeito de cloretos na aceleração das taxas de corrosão, pelo mesmo efeito de lavagem das superfícies expostas.

A equação estabelecida por Pourbaix (Equação 4) é a que mais vêm sendo utilizada nos últimos anos para definir a cinética da corrosão atmosférica, e permite a predição da taxa de corrosão em longo prazo para determinadas regiões, apenas considerando-se o primeiro ano de exposição do material às intempéries (SICA, 2006).

$$P = K \times t^n \quad (4)$$

Onde: (P) representa a perda de espessura média do metal por corrosão em μm ao longo de (t) anos ou meses de exposição atmosférica; (K) e (n) são constantes calculadas pela linearização logarítmica desta equação exponencial. A constante (K) representa a velocidade de corrosão em μm durante o primeiro ano de exposição, e a constante (n) sugere o efeito passivador do ambiente, o qual depende diretamente da composição do metal, das condições físico-químicas dos diferentes tipos de atmosfera e de condições de exposição (SICA, 2006).

3.2.2.1 Mecanismo do processo de corrosão atmosférica

Como comentado anteriormente, a cinética do processo de corrosão atmosférica é influenciada por fatores climáticos e ambientais.

A composição química básica da atmosfera é uma mistura de gases que pouco varia, e os principais componentes são o oxigênio, o nitrogênio e o vapor d'água. Mas, alguns contaminantes podem estar presentes em proporções variáveis de acordo com a proximidade das fontes e das condições climáticas. São provenientes de fontes naturais, como é o caso dos íons cloreto, em regiões litorâneas, ou fontes artificiais, resultado das atividades antrópicas, como fumaça, cinzas, partículas em suspensão, vapores ácidos e gases de motores de combustão interna e de processos industriais.

Os fatores climáticos e ambientais vão formar o macroclima, caracterizado pelo ambiente ao redor dos materiais, e o microclima, que é o clima específico que se forma na superfície dos materiais (FELIU, 1982). Na Figura 4, encontra-se ilustrado um esquema comparando esses fenômenos.

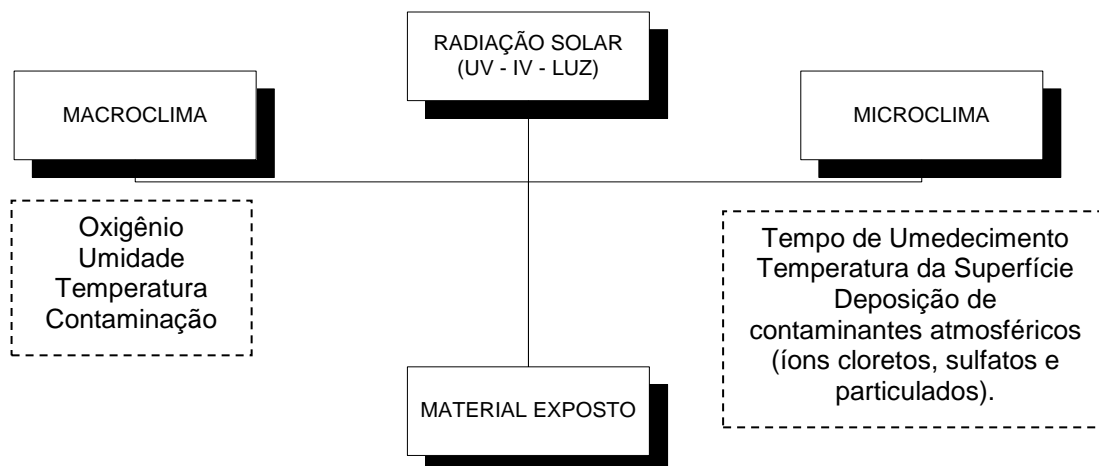


Figura 4. Variáveis do processo de corrosão atmosférica (SICA, 2006).

O macroclima de uma região contribui diretamente no processo de degradação e é definido por precipitações aquosas (chuva, neve, neblina), a condensação da umidade ocorrida por mudanças de temperatura (orvalho) aliada à radiação solar e a composição química da atmosfera, que no presente projeto vai ser direcionada aos teores de sulfato e cloreto. Por sua vez, o microclima vai estar relacionado com a camada de eletrólito presente na superfície do material, composto por tempo de superfície úmida, derivado do orvalho e das precipitações, pelo aquecimento dos materiais pela radiação, principalmente infravermelha, e pelo acúmulo de íons halogenetos (SO_3 , NO_x , Cl). A tendência é que quanto menor seja a camada de eletrólito, maior será a deposição desses contaminantes atmosféricos (FELIU, 1982).

a) Umidade;

A película de eletrólito que vai ser formada na superfície do material vai ser conseqüência de uma exposição a um teor crítico de umidade, que vai depender da natureza corrosiva do metal e dos poluentes que estão presentes no meio, basicamente. Como o fenômeno da degradação é eletroquímico, a umidade relativa

do ar vai constituir um dos fatores mais importantes no processo (J-ATTWOOD, 1992).

Como definido por Viana, 1980, a umidade relativa (UR) é a relação, em porcentagem, entre a quantidade de vapor d'água existente no ar e a quantidade máxima que o ar pode conter, na mesma temperatura. Esta UR pode ser expressa em função da pressão, sendo (P) a pressão parcial do vapor existente à temperatura média da região em estudo e (P_s) a pressão de saturação a essa mesma temperatura, conforme definido na Equação (5):

$$UR = \frac{P}{P_s} \times 100 \quad (5)$$

Somente com a presença de um filme de água a corrosão vai ocorrer significativamente, caso contrário não existe a formação de um eletrólito sobre o metal. É de extrema importância, portanto, verificar o tempo de superfície úmida que vai indicar a duração do processo eletroquímico (SILVA, 1989). O teor crítico de umidade relativa pode variar de 40% para atmosferas ricas em cloretos a 85% em atmosferas que contém gases à base de enxofre (VIANA, 1980).

Mendoza e Corvo, 2000, observaram que a corrosão atmosférica vai ser mais acentuada se o local apresentar ciclos freqüentes de “seco e molhado”, com a formação de orvalho devido às variações de temperatura que se dão no período diurno e noturno, ou também quando se tem dois períodos no ano de chuva e de estiagem bem definidos, como o que ocorre em Salvador.

b) Influência da distância da ECA em relação ao mar;

O aspecto mais importante no estudo da corrosão atmosférica em zonas costeiras é a distância da ECA em relação ao mar. Os dois locais estudados estão muito próximos à zona de arrebentação marinha e o principal agente contaminante vai ser o cloreto (BARTON, 1976). Esses íons tendem a destruir toda a camada passivante formada na superfície do material, por aumentarem consideravelmente a condutividade da camada do eletrólito no metal.

Em uma distância menor que 500 m da orla, estima-se que o potencial médio de agressão aos materiais expostos seja cerca de 8 vezes maior do que materiais expostos além dessa distância (COSTA, 2001). Em estudo realizado em Salvador,

foi observado que nos primeiros 400 m de solo a partir da costa, há uma redução acentuada da concentração de cloretos (VILASBOAS, 2004, PORTELLA, 2011).

O aerosol marinho compreende partículas de diversos tamanhos, suspensas no ar, sólidas ou líquidas, que variam de 0,1 a 400 μm , e sua concentração na atmosfera vai depender da altitude e da velocidade dos ventos. Quanto maior o tamanho das partículas, menor o tempo de permanência na atmosfera. Partículas consideradas pequenas (menores que 10 μm) podem viajar centenas de quilômetros sem que sedimentem. Para Ambler e Brain *apud* Morcillo *et al.*, 2000, a corrosão na superfície dos materiais vai ser causada por partículas maiores que 10 μm , já que, mesmo que essas partículas viajem muito, irão se dissipar na atmosfera e não mais caracterizarão um ambiente marinho em longas distâncias. É importante ressaltar que não apenas a distância do mar vai ser o fator determinante nas taxas de corrosão, mas, também, as características topográficas e orográficas da região, bem como a intensidade e a direção predominante dos ventos, conforme citado anteriormente (MORCILLO *et al.*, 2000). Vale lembrar que são registradas altas concentrações de cloretos nas passagens das tempestades, sempre dependendo da direção do vento.

Em ambientes costeiros, maiores distâncias da orla vão fazer com que os aerossóis vindos pelo vento se depositem com a gravidade e, também, sejam barrados pela vegetação, por exemplo, ou em falésias, e sendo assim, mesmo locais muito próximos do mar possam ter concentrações consideradas equivalentes a ambientes rurais (MORALES *et al.*, 2004).

c) Influência da ação dos ventos;

O impacto do vento na superfície marítima origina a formação de bolhas que explodem, formando gotículas ou espuma e dando origem ao aerosol, fazendo com que haja liberação de partículas de sal (cuja composição esperada para águas oceânicas é de mais de 50% de compostos de cloreto). Algumas pesquisas foram realizadas a fim de descobrir em que velocidades de vento estão às maiores concentrações de aerosol. O aumento da deposição salina ocorre a partir de vento com 3,0 m/s, e é maior para velocidades entre 7,0 e 11,0 m/s (FELIU, 1993).

Ventos de tempestade podem depositar sobre as ECA's grandes quantidades de partículas iônicas e, apesar de serem de curtas durações são capazes de carregar concentrações equivalentes a um mês inteiro. Porém, o aumento da velocidade dos ventos nem sempre vai agir de forma a aumentar os teores de cloreto, já que a direção do vento também deve ser levada em consideração (MORCILLO *et al.*, 2000). Esse aumento pode ajudar purificando o ar e diminuindo a concentração de contaminantes nos locais das ECA's.

Regiões com grandes intensidades de vento podem ocasionar a degradação dos materiais por abrasão eólica e, também, vão influenciar no tempo de secagem do eletrólito na superfície do metal, bem como na dispersão de poluentes atmosféricos. Geralmente, há flutuações nos valores de temperatura e umidade, modificando o macroclima da região.

Duas variáveis que estão interligadas diretamente e devem ser analisadas principalmente em regiões costeiras são o regime dos ventos e a concentração dos cloretos. Ventos que vem do mar são os que governam os teores de cloreto na atmosfera marinha. Assim, por intermédio da caracterização de seus parâmetros se torna possível estimar as deposições ocorridas em qualquer região, sem que sejam necessários testes de campo que levam tempo e precisam de consideráveis investimentos (MORCILLO *et al.*, 2000).

d) Temperatura;

O monitoramento das flutuações de temperatura é bastante importante no entendimento dos processos de corrosão atmosférica (CASCUDO, 1997). O aumento da temperatura vai levar a um aumento na velocidade das reações e da mobilidade iônica e, por isso, considera-se que em locais com maiores médias a degradação seja maior. Porém, a diminuição desse parâmetro leva à condensação, aumentando a umidade local (PORTELLA, 2011). Quedas bruscas de temperatura, como ocorrem em alguns meses no litoral paranaense durante o inverno, principalmente, podem levar a um aumento da umidade relativa e fazer com que seus valores ultrapassem a umidade crítica, favorecendo a degradação.

Mas, temperaturas mais elevadas vão diminuir a possibilidade de condensação do vapor de água na superfície metálica e a adsorção de poluentes

atmosféricos, diminuindo a permanência do eletrólito sobre o metal, reduzindo, assim, a velocidade cinética da corrosão. Já, a combinação de altas temperaturas e o contato prolongado do eletrólito com o metal vai resultar em uma degradação acelerada. Sendo assim, é possível que de acordo com as variações climáticas locais, regiões com temperaturas relativamente mais baixas possam apresentar taxas maiores de corrosão que locais com temperaturas elevadas (UHLIG, 1975).

e) Precipitação;

As precipitações vão agir de maneiras diferentes, variando de acordo com a intensidade. Em atmosferas marinhas, as chuvas vão levar a dissolução dos íons provenientes dos aerossóis marinhos, principalmente Cl^- e SO_4^{2-} , fazendo com que haja um aumento nas concentrações na superfície dos materiais (MORCILLO, *et al.*, 2000).

É importante ressaltar que chuvas de grandes intensidades são capazes de lixiviar ou lavar a superfície dos materiais, diluindo os contaminantes e diminuindo a concentração dos eletrólitos, fazendo com que as taxas de corrosão sejam menores (MORCILLO *et al.*, 2000). Portanto, as chuvas podem ter uma ação benéfica em atmosferas poluídas, por lavarem a superfície metálica exposta, impedindo a concentração do agente atmosférico corrosivo sobre o material. Assim, nas atmosferas marinhas, serão os principais agentes veiculadores para deposição de cloretos, junto com o regime de ventos.

f) Radiação Solar;

A radiação solar acumulada influencia diretamente na temperatura de superfície do material e, assim, produz ciclos úmidos e secos, podendo aumentar ou reduzir as taxas de corrosão. Esses ciclos são caracterizados pela intensidade da luz solar e, também, pela refletividade da superfície metálica em relação ao sol. Em grandes intensidades, remove a umidade superficial, diminuindo a corrosão (SICA, 2006).

g) Teor de Cloretos;

Os íons cloretos são extremamente agressivos à maioria dos materiais de redes elétricas, por originarem produtos de corrosão mais solúveis que em atmosferas rurais (VERGÉS, 2005). A principal fonte desses íons, como já foi citado anteriormente, é a água do mar, onde se encontram em sua maioria combinados com sódio, magnésio e cálcio. São sais higroscópicos, que promovem a condensação de água sobre a superfície dos materiais e, assim, favorecem a degradação. Esses íons, quando dissolvidos na camada de umidade, vão ser os principais responsáveis pela dissolução da camada passivante dos metais em regiões costeiras.

Os cloretos produzem ataques localizados nas estruturas, na forma de perfurações muito pequenas, que se propagam rapidamente, denominados pites (GENTIL, 2003). Por serem pequenos, dificilmente são observados, e muitas vezes vão ser detectados somente após a quebra da estrutura por falha mecânica. Dentro dos pites, são criadas condições necessárias que estimulam continuamente a atividade corrosiva, e esta reação é denominada anódica autocatalítica.

Na Tabela 7, está mostrada, a título de informação, a composição química média elementar da água do mar, em quantidades aproximadas, de acordo com a norma ASTM D 1141-90.

Tabela 7. Composição química elementar da água do mar, em quantidades médias aproximadas (ASTM 1141, 1990).

Composto	Concentração (g/L)
NaCl	25,5
MgCl ₂	5,2
Na ₂ SO ₄	4,1
CaCl ₂	1,2
KCl	0,9
NaHCO ₃	0,2
KBr	0,1
H ₃ BO ₃	0,03
SrCl ₂	0,03
NaF	0,003
Ba(NO ₃) ₂	9,94x10 ⁻⁵
Mn(NO ₂) ₂	3,4 x10 ⁻⁵
Cu(NO ₃) ₂	3,08 x10 ⁻⁵
Zn(NO ₃) ₂	9,6 x10 ⁻⁶
Pb(NO ₃) ₂	6,6 x10 ⁻⁶
AgNO ₃	4,9 x10 ⁻⁷

h) Teor de Sulfatos.

Um dos principais poluentes estudados em corrosão atmosférica é o dióxido de enxofre, que é bastante encontrado em atmosferas urbanas e industriais. São 2 suas fontes principais: a fonte natural, provenientes de atividades vulcânicas e a fonte antropogênica, resultado da queima de combustíveis fósseis (UHLIG, 1975).

Os combustíveis originados a partir da matéria orgânica contêm aminoácidos e proteínas, que por sua vez contêm teores mais elevados em compostos de enxofre, liberados durante a queima destes. Sendo o SO₂ um gás extremamente reativo, sob condições de muita umidade, é absorvido pelas superfícies dos materiais na forma de trióxido de enxofre (SO₃) e dá origem ao ácido sulfúrico, causador das chuvas ácidas.

A intensidade de ação desses gases é diretamente proporcional à distância da fonte, já que o tempo de vida do SO_2 na atmosfera é curto (0,5 a 2 dias) e é transportado, apenas, em pequenas distâncias (ISO 9224, 1992), conforme gráfico ilustrado na Figura 5. Assim, torna-se muito difícil encontrar grandes concentrações deste poluente fora de pólos industriais ou atmosferas urbanas, a não ser que haja a proximidade de uma fonte natural. O mecanismo de ataque é semelhante ao do NO_x , quase que generalizado.

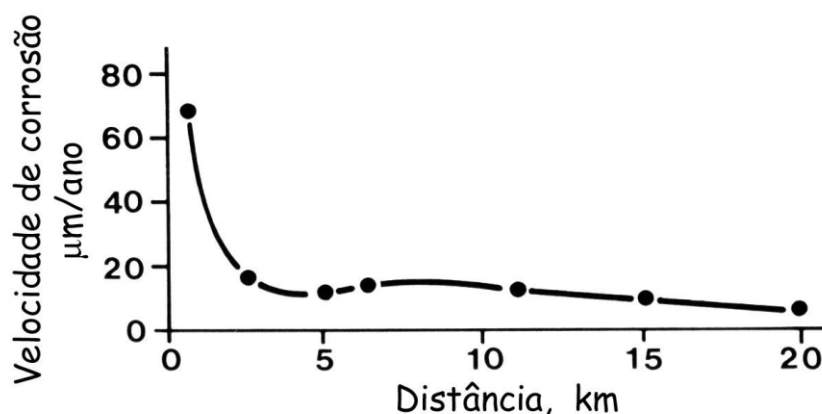


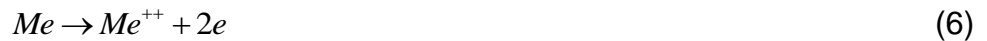
Figura 5. Efeito da distância da fonte sobre a velocidade de corrosão (VERGÉS, 2005).

3.3 A CORROSÃO DE ESTRUTURAS METÁLICAS

O estudo está centrado nos 4 materiais metálicos, já citados e muito utilizados pela engenharia elétrica, tais como: o cobre, pelas suas características de alta condutividade elétrica e grande resistência à corrosão atmosférica, tendo aplicações como condutor em linhas de distribuição elétrica, na indústria eletrônica, em linhas de comunicação, etc.; o alumínio e suas ligas, em cabos e acessórios de rede; o aço carbono e o aço galvanizado pelo emprego em estruturas tipo torres de transmissão de energia elétrica e outros acessórios como postes metálicos, cruzetas, transformadores, entre outros.

3.3.1 Corrosão atmosférica do aço carbono

De acordo com a termodinâmica, um metal se dissolve pela formação de íons metálicos de acordo com as Equações (6) e (7):



$$E^0 = -\frac{RT}{nF} \cdot \ln \cdot [Me^{++}] \quad (7)$$

Na Equação (7) está demonstrado o potencial da reação, dado pela fórmula de Nernst, na qual o E^0 é a força eletromotriz; n indica o número de elétrons transferidos; $R=8,315 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$; $T= 25 \text{ }^\circ\text{C}$; $F= 96.485 \text{ C mol}$ (POURBAIX, 1990).

Com um potencial menor, não há dissolução e, acima deste, a forma estável é a iônica, dissolvendo o metal, conforme a Equação 6, independente do pH do meio. Porém, os íons H^+ e OH^- condicionam as reações, por darem lugar a hidróxidos ou óxidos que podem ser mais ou menos protetoras. Acima de determinados valores de potencial, distintos para cada metal, os metais se dissolvem e juntamente com os hidróxidos e óxidos previamente precipitados, vão dar origem a ânions ou íons complexos.

Nas condições em que se formam os produtos solúveis, ocorre a corrosão, enquanto que, a formação de produtos insolúveis pode paralisá-la, protegendo o metal por passivação. A velocidade de corrosão alcança em um determinado período de exposição um regime estável e, a partir daí, não há alteração significativa durante a exposição posterior (SICA, 2006).

Os produtos da corrosão do ferro são distintos de acordo com a atmosfera exposta. Em atmosferas rurais, urbanas e industriais, longe da costa, os mais detectados são exclusivamente a goetita e lepidocrocita. Já, em atmosferas marinhas, são detectadas a formação da akaganeita e magnetita, e com posterior lixiviação com água destilada quente e posterior concentração, são encontrados cloretos e sulfatos de ferro solúveis, que tendem a se concentrar na camada aderente de produtos da corrosão (BRAMBILLA, 2011).

3.3.2 Corrosão atmosférica do aço galvanizado

O zinco é utilizado no revestimento de superfícies de aço por ser apropriado e ter a capacidade de melhorar a resistência quanto à corrosão do ferro e do aço. A vida útil dos revestimentos de zinco é mais dependente da espessura do que do método de aplicação (imersão a quente, revestimento metalizado ou galvanoplastia). Foram realizados testes nos Estados Unidos que mostram que um revestimento de

0,025 mm em áreas suburbanas ou rurais duram cerca de 11 anos, 8 anos nas áreas marinhas e quase 3 anos no litoral. Esse composto atua como um ânodo de sacrifício sobre o aço, conferindo-lhe proteção galvânica eficaz, evitando um impacto direto de ataque corrosivo sobre o mesmo (NATESAN *et al.*, 2006).

Na camada mais externa da superfície do zinco corroído, de 1 nm, contaminantes tais como o cloreto e íons sulfato se depositam. A carga negativa dos produtos de corrosão do zinco tem a capacidade de repelir os íons cloreto e impedem, assim, o ataque a este componente (NATESAN *et al.*, 2006).

3.3.3 Corrosão atmosférica do cobre

O cobre é bastante utilizado nas indústrias de comunicação e eletroeletrônica por ter uma alta condutividade e em arquitetura por ter grande resistência (VERA *et al.*, 2008). Em contato com o oxigênio atmosférico, o primeiro produto de corrosão formado na sua superfície é a cuprita (Cu_2O). Em seguida, se formam sais alcalinos, quando em condições de alto pH, que são resultados da reação com os contaminantes atmosféricos (SO_2 , Cl, CO_2). A camada interna da cuprita se comporta - como uma barreira física evitando a oxidação do metal assim como os outros produtos de corrosão formados, conferindo resistência quando em condições atmosféricas. Os sais alcalinos formados são insolúveis, e conferem, também, proteção ao material (GENTIL, 2003).

Em condições de alta umidade, ocorre a adsorção e a oxidação do dióxido de enxofre (SO_2) e, junto com os óxidos de nitrogênio, vão levar a formação das pátinas. A presença de íons cloreto na atmosfera favorece a formação desse produto, já que são higroscópicos, e ajudam na formação de uma camada aquosa na superfície do material. De cor salmão, depois marrom-escuro e por fim, verde, esses produtos de corrosão são estudados já que conferem ao cobre grande resistência à degradação em ambientes expostos (VERA, 2007).

Diversos trabalhos vêm sendo feitos para observar as taxas de corrosão do cobre tanto expostos diretamente na atmosfera quanto por testes de laboratório e têm demonstrado o efeito deletéreo tanto dos íons cloreto quanto do teor de umidade (MENDOZA e CORVO, 2000).

3.3.4 Corrosão atmosférica do alumínio

O metal mais utilizado nos dias de hoje em redes de distribuição e linhas de transmissão é o alumínio e suas ligas (MENDOZA e CORVO, 2000). A sua resistência é relacionada com a formação de um filme protetor contínuo, tenaz e muito aderente de óxido de alumínio hidratado ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), que se forma rapidamente quando em contato com o ar em soluções de pH neutro, e por ser insolúvel é capaz de exercer excelente barreira contra a corrosão atmosférica (MORCILLO *et al.*, 2000).

O processo de degradação desse material é mais complexo que o do zinco e do cobre, já que pode ser atacado de maneira uniforme quando ocorre a dissolução da camada de óxido por ácidos ou outros íons reativos, levando a formação de sais solúveis e, também, pelos pites, que se constitui no seu dano principal (GENTIL, 2003). A presença de contaminantes atmosféricos como os cloretos e dióxidos de enxofre agem no alumínio de forma a produzir compostos mais solúveis, modificando a cinética da corrosão.

Em zonas costeiras, os íons cloreto formam com o alumínio, complexos solúveis, que com o afinamento da camada protetora de óxido vai fazer com que surjam fissuras, que podem atingir grandes profundidades, muitas vezes, que não são notáveis a primeira vista, mas podem fazer com que o material perca sua função estrutural por danos mecânicos. Assim sendo, a avaliação de densidade e profundidade das fissuras é mais relevante na análise do processo corrosivo do que a perda de massa, ao contrário dos demais metais padrão. Porém, a perda de massa continua a ser a técnica mais empregada na averiguação das taxas de corrosão do alumínio, já que a medição das fissuras é bastante complicada e necessita equipamentos mais precisos (SICA, 2006).

3.4 CORROSÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

O concreto armado é o material da engenharia mais utilizado no mundo. Seus constituintes básicos são: o cimento (aglomerado hidráulico), a pedra britada (agregado graúdo), a areia (agregado miúdo), a água, aditivos e adições minerais, que podem ser eventualmente usados com o propósito de aumentar a durabilidade

e/ou a resistência das estruturas, e a armadura metálica, constituída de barras de aço. A corrosão das armaduras é um dos principais fatores que influenciam na redução de sua vida útil (NEVILLE, 1997).

O concreto é um material poroso, já que o uso da água nas massas torna impossível o preenchimento total dos vazios entre os agregados e a pasta de cimento. Os poros fazem a ligação com o exterior das estruturas, fazendo com que haja um transporte de gases, água e substâncias muitas vezes agressivas para seu interior. Os mecanismos de degradação das estruturas se fundamentam na estrutura desses poros (METHA e MONTEIRO, 1994).

As armaduras de aço fornecem ao material uma excelente resistência mecânica tanto a compressão quanto a tração. Mas a corrosão da armadura é um problema crítico, capaz de comprometer as características de estabilidade e durabilidade das estruturas (METHA e MONTEIRO, 1994).

A deterioração observada pode estar associada a fatores mecânicos, como vibrações e erosão; físicos, com variações na temperatura; biológicos, com ação de bactérias sulfato redutoras; ou químicos, nas inscrustrações de ácidos e sais (GENTIL, 2003).

No presente projeto vão ser tratados apenas a ação dos dois contaminantes atmosféricos que vêm sendo estudados: teores de cloreto e de sulfato, já que, principalmente o primeiro, é o mais relevante em zonas costeiras.

Dentre os ambientes naturais não poluídos, aquele que apresenta maior agressividade as estruturas é a atmosfera marinha (JOUKOSKI, 2001). A presença de sais compostos principalmente por cloreto é a principal causa da deterioração precoce do concreto armado em regiões litorâneas. Os sais podem diminuir a ação protetora da película de passivação existente, diminuindo a resistividade, e facilitando o processo de corrosão das armaduras. A norma européia EN 206-1 classifica a agressividade dos ambientes marinhos como nível 4, sendo a situação mais crítica o nível 5 (JOUKOSKI, 2003).

Em presença de cloretos, a corrosão da armadura de aço do concreto ocorre de forma localizada, os pites, e, geralmente, vai ter início após a destruição da camada de óxido passivadora do aço, que por sua vez, vai depender do pH da solução contida nos poros do concreto. Existem diversas normas a serem seguidas

para limitar o conteúdo máximo de cloretos nos componentes da mistura (água, agregados e aditivos). No Brasil, a norma NBR 6118:2007 estipula um teor máximo de cloretos de 500 mg/L, em relação ao peso de água de amassamento, e não permite que sejam usados aditivos contendo esse composto (NBR 6118, 2007).

Assim, como para os materiais metálicos, na norma técnica está descrita uma classificação de agressividade ambiental, transcrita na Tabela 8, que está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas e vão ser avaliadas segundo as condições de exposição dessas.

Tabela 8. Classes de Agressividade Ambiental para estruturas de concreto, conforme a norma da ABNT NBR 6118:2007.

Classe de Agressividade Ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito do projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural Submersa	Insignificante
II	Moderada	Urbana ^{1),2)}	Pequeno
III	Forte	Marinha ¹⁾ Industrial ^{1),2)}	Grande
IV	Muito forte	Industrial ^{1),3)} Respingos de maré	Elevado

¹⁾ Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

²⁾ Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

³⁾ Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Um fator fundamental a ser observado na corrosão atmosférica do concreto armado é a espessura da camada do concreto sobre a armadura, que vai estar relacionada com a agressividade do meio. Para garantir o cobrimento mínimo (C_{min}) o projeto e a execução devem considerar o cobrimento nominal (C_{nom}), que é o

cobrimento mínimo acrescido da tolerância de execução (Δc). Existem recomendações da norma brasileira, que estão dispostas na Tabela 9.

Tabela 9. Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm (NBR 6118, 2007).

Tipo de Estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto Armado	Laje	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50

Os íons sulfatos também são agressivos ao concreto armado e podem causar perda de resistência, expansões volumétricas, trincas e degradação.

As armaduras de estruturas de concreto armado se encontram passivadas por uma fina película de óxido devido a alcalinidade do concreto, cujo pH encontra-se geralmente acima de 12,5 (METHA e MONTEIRO, 1994). O aumento da resistência é dado pela polarização, que ocorre durante a modificação do potencial de um eletrodo ou sistema eletroquímico alterando o equilíbrio eletroquímico das reações anódicas e catódicas que vão ocorrendo simultaneamente (METHA e MONTEIRO, 1994).

O potencial do aço no interior do concreto armado está entre +100 mV e -400 mV, em meio alcalino, medido com um eletrodo de referência de cobre/sulfato de cobre em solução aquosa, estando o aço em uma condição estável ou de passividade.

A célula eletroquímica formada no concreto apresenta o desenvolvimento de regiões anódicas e catódicas sobre a superfície do aço (Figura 6), existindo entre elas uma diferença de potencial eletroquímico ocasionado por três fatores principais: diferenciais de aeração (disponibilidade de oxigênio), de concentração salina (quantidade de eletrólito ou concentração de íons agressivos na solução dos poros) ou de tensões (solicitações impostas, tensões residuais, impurezas ou falhas superficiais do aço), entre outras possíveis heterogeneidades presentes na armadura (CASCUDO, 1997).

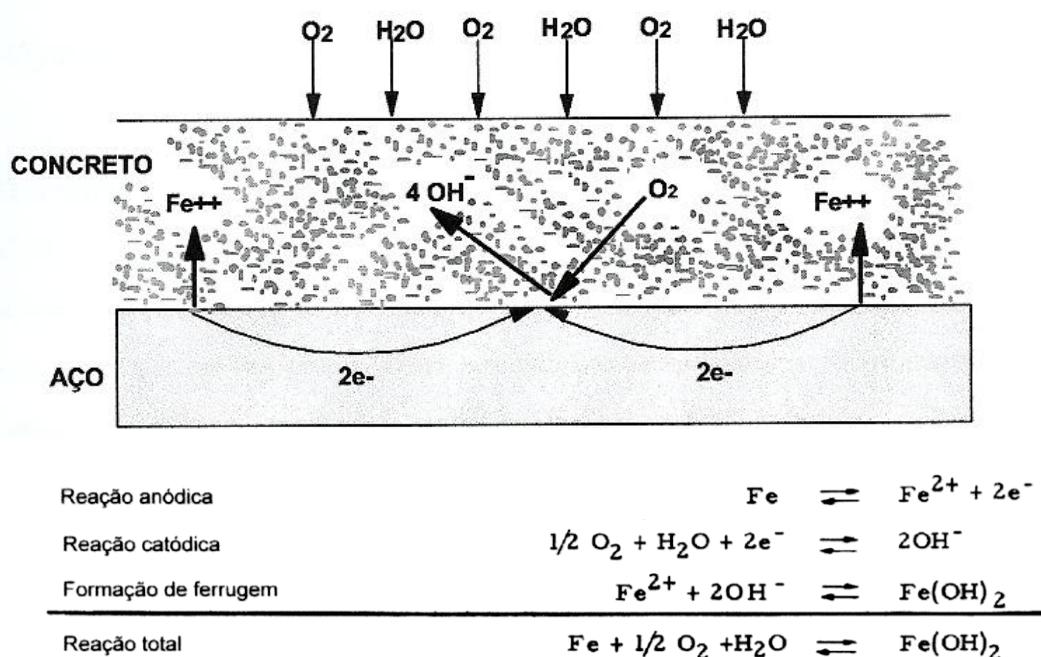


Figura 6. Esquema da corrosão da armadura do concreto, mostrando a difusão de O_2 através do cobrimento do material (JOUKOSKI, 2003).

As reações de oxidação do ferro (anódico) e a de redução de oxigênio (catódico) sobre o eletrodo definem espontaneamente o potencial de corrosão (E_{corr}). Quando estão em equilíbrio, a velocidade dos processos é igual. A despassivação da armadura ocorre quando há uma alteração do pH no interior da estrutura do concreto, por conta da penetração de cloretos do ambiente, carbonatação ou lixiviação. É o fim do período de iniciação da corrosão, no qual as substâncias agressivas vão penetrando na armadura. O cloreto é um dos principais responsáveis por essa despassivação (GENTIL, 2003).

O procedimento de campo mais utilizado para monitorar estruturas de concreto armado é o levantamento dos potenciais de corrosão (CASCUDO, 1997). Seus valores numéricos não fornecem porém, informações quantitativas, ou seja, não é possível extrair informações sobre a velocidade de corrosão real da armadura. O procedimento detecta a presença de linhas de corrente que se verificam quando há um processo eletroquímico de corrosão nas armaduras, ou melhor, a presença de zonas ativas de corrosão nas barras. Monitoramentos periódicos se fazem necessários a fim de determinar o instante em que ocorre a mudança do estado passivo para o estado ativo de deterioração na armadura.

Os potenciais de corrosão dos metais nos concretos são parâmetros termodinâmicos que dependem de inúmeras variáveis, e indicam o balanço entre a reação anódica e catódica. São duas células e se verifica a diferença de potencial entre estas: a semicélula aço/concreto (eletrolito) e a semicélula estável, que é o eletrodo de referência de cobre/sulfato de cobre. O último vai detectar a presença das linhas de corrente, que se verificam quando há um processo eletroquímico de corrosão das armaduras. Por onde passam essas linhas de corrente, os valores vão ser mais eletronegativos que nos locais passivados, que vão indicar a presença de zonas ativas de corrosão nas barras de aço (ANDRADE, 1988 *apud* JOURKOSKI, 2003).

A durabilidade e o comportamento mecânico do concreto pode ser otimizado com o uso de aditivos industrializados e adições minerais, podendo conferir melhorias significativas. Neste projeto serão testados além do concreto referência, os seguintes aditivos: metacaulim, fibra polimérica, borracha de pneu e sílica ativa, com o objetivo de verificar em ambas as regiões qual material tem maior vida útil em serviço.

Os aditivos são produtos químicos que podem ter diversas funções: aceleradores, retardadores, incorporadores de ar, plastificantes e superplastificantes e seus derivados. São adicionados ao concreto a fim de alterar suas propriedades, seja da mistura fresca ou do material endurecido (METHA e MONTEIRO, 1994).

4 EXPERIMENTAL

Neste capítulo, está apresentada a metodologia adotada no projeto, enfatizando as diferenças em relação às normas ou dados da literatura, quando pertinentes.

4.1 ESTAÇÕES DE INTEMPERISMO NATURAL, ECA'S

A implantação das estações de intemperismo natural teve como finalidade avaliar a agressividade dos contaminantes atmosféricos, aliada às condições climáticas locais, sobre o desempenho de corpos de prova metálicos e de concreto, para as duas diferentes regiões do Brasil.

No nordeste, a ECA está localizada na Costa do Sauípe, região metropolitana de Salvador, com as coordenadas 12°26,615 S e 37°55,5045 W. Já, na região sul, a estação fica no Centro de Estudos do Mar, no balneário de Pontal do Sul, no município de Pontal do Paraná. Ambas ficam na região costeira, a uma distância menor do que 500 m do mar, para investigar a ação dos aerossóis marinhos sobre os materiais expostos.

O projeto teve início em agosto de 2009, quando foram expostas dezesseis placas metálicas em um painel de intemperismo natural na ECA de Pontal do Sul, em paralelo com outro projeto que já vinha sendo desenvolvido pelo LACTEC em parceria com a Companhia Elétrica da Bahia (COELBA). Estes corpos-de-prova (CP's) são dos metais padrão, sendo quatro de cada: aço carbono, cobre, alumínio e aço galvanizado. Os painéis foram instalados conforme norma ABNT NBR 6209. Os CP's têm uma área média, aproximada, de 31.000 mm². Antes de serem expostos, foram limpos com acetona, pesados e realizados medidas da largura, comprimento e altura, conforme a norma ABNT NBR 6210, além de uma limpeza química, ilustrada na Tabela 10. Uma placa de cada material foi retirada a cada 3 meses, a fim de se avaliar quantitativamente o processo corrosivo.

A composição química elementar presente nos metais padrão está apresentada na Tabela 11. Os CP's de aço galvanizado são constituídos de aço

carbono (substrato) e revestidos com zinco por imersão a quente com a espessura de camada de 80 µm.

Tabela 10. Soluções utilizados no preparo e limpeza dos corpos de prova metálicos antes de serem expostos nas ECA's.

Corpo de Prova	Método/Solução de limpeza
Aço carbono	Jateamento abrasivo da superfície com granalha de aço
Alumínio	Solução de hidróxido de sódio (1L de H ₂ O; 30 g- NaOH)
Cobre	Solução de ácido nítrico (1L-H ₂ O; 50ml-HNO ₃)
Aço galvanizado	Solução de hidróxido de amônia (1L-H ₂ O; 150ml NH ₄ OH)

Tabela 11. Composição química elementar presentes nos metais padrão.

		Aço Carbono 1020	Alumínio 6351	Cobre eletrolítico
Elementos Químicos (%)	S	0,02	-	-
	C	0,03	-	-
	Ti	0,01	0,01	-
	P	0,01	0,01	0,01
	b			
	C	0,01	0,15	-
	u			
	M	0,33	0,01	0,01
	g			
	Si	0,04	0,08	0,02
	Al	0,03	-	0,01
	Ni	0,01	0,01	0,01
	P	0,01	-	-
	Cr	0,01	0,01	0,01
	M	0,01	-	-
	o			
	F	-	0,38	0,01
	e			
	Z	-	0,01	0,01
	n			
	S	-	0,01	0,01
	n			
	A	-	-	0,01

g	C	-	-	0,01
d	B	-	-	0,01
e	C	-	-	0,01
o	M	-	-	0,01
n				

Após o período de exposição, os CP's foram passados por prévia inspeção visual, registro fotográfico e limpeza adequada dos produtos de corrosão de acordo com cada tipo de material. Os métodos de limpeza foram realizados conforme as recomendações das normas ABNT NBR 6210 e ASTM G1-90.

A taxa de corrosão foi obtida por meio de um cálculo que relaciona a massa final e a massa inicial (SICA, 2006).

$$Taxa\ de\ corros\tilde{a}o = \frac{K \cdot M}{S \cdot t \cdot \rho} \quad (8)$$

Onde (K) é uma constante que determina a unidade da taxa de corrosão; (M) é a perda de massa em gramas, com aproximação de um miligrama; (S) é a área do CP em cm², com aproximação de 0,01 cm²; (t) é o tempo de exposição em horas e (ρ) é a massa específica em g/cm³ (SICA, 2006).

4.2 DETERMINAÇÃO DOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

O teor de cloretos existente na atmosfera foi medido mensalmente conforme a norma ABNT NBR 6211 que prescreve o método da vela úmida, sendo empregado, especificamente, a determinação de ácido clorídrico (HCl) proveniente de atmosferas poluídas e de cloretos solúveis em água como os existentes em aerossóis de atmosferas marinhas. Neste método, o íon cloreto contido no ar atmosférico é adsorvido na superfície de uma gaze umedecida e exposta ao ambiente, em local protegido de raios solares e chuva, sendo transferido, posteriormente, a uma solução aquosa. Sua concentração é expressa em mg/m².dia de íons cloretos (Cl⁻).

A aparelhagem dos coletores de cloretos é composta de vela coletora, frasco coletor, suporte do frasco coletor e proteção do equipamento.

A metodologia proposta pela norma no projeto foi adaptada, e o íon cloreto foi determinado quantitativamente por cromatografia iônica, ao invés do método de titulação de alíquotas volumétricas desta com solução de nitrato de mercúrio na presença de indicador misto difenilcarbazona-azul de bromofenol, até ao ponto final de viragem, de cor azul-violeta, pela formação do complexo mercúrio-difenilcarbazona. A vantagem está no poder de explorar outros ânions, também solúveis no sistema de adsorção (PORTELLA, 2011).

A investigação da taxa de sulfatação total foi realizada conforme a norma ABNT NBR 6921, 1981, que prescreve o método para determinação gravimétrica da taxa de sulfatação total na atmosfera, obtida pela oxidação ou fixação, em uma superfície reativa, de compostos de enxofre como SO_2 , SO_3 , H_2S e SO_4^{2-} . Tal como indicado no item anterior, sua determinação quantitativa também foi obtida pela técnica da cromatografia iônica, ao invés da indicada na própria norma.

Nos coletores de sulfato, a vela coletora é a base de dióxido de chumbo (PbO_2), e necessita de abrigo, constituído por uma caixa com venezianas, que proporciona proteção contra a chuva e assegura a ventilação. Os resultados foram obtidos a partir de cálculos estequiométricos equivalentes ao dióxido de enxofre, expressos em miligramas de dióxido de enxofre por unidade de área (cm^2), por dia.

4.3 CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA E LEVANTAMENTO DE DADOS METEOROLÓGICOS

As duas regiões consideradas têm diferentes características climáticas. Pontal do Paraná é classificado como uma região subtropical úmida, com predomínio da massa polar atlântica, sendo afetada pela massa tropical marítima. O clima é controlado por massas de ar tropicais e polares. A temperatura média anual na região é de $(21 \pm 1)^\circ\text{C}$ e a precipitação anual entre 1500 a 2000 mm, com nenhum período seco. O período mais chuvoso é o verão (SIMIELLI, 2000). Para o estudo, foi montada uma estação de corrosão atmosférica (ECA) a, aproximadamente, 300 m do mar, perto da desembocadura sul do Complexo Estuarino de Paranaguá, no Centro de Estudos do Mar, da Universidade Federal do Paraná.

A outra ECA fica na região metropolitana de Salvador (RMS), em Sauípe, a cerca de 250 m do mar. O clima da região é litorâneo úmido, com cerca de 2466 h anuais de sol, ventilada (ventos anuais com velocidade média de 2,2 m/s), controlado por massas de ar equatoriais e tropicais, mas, influenciado pela massa tropical marítima. A temperatura média anual é 25 °C e com uma umidade média anual na ordem de 81%. O tempo de superfície úmida é bastante elevado (maior que 4000 h/ano), classificado pela norma NBR 14643/01 como de alta corrosividade ambiental (C₄) (BRAMBILLA, 2011). O inverno é o período mais chuvoso (SIMIELLI, 2000).

Os parâmetros meteorológicos utilizados foram: temperatura do ar, velocidade e direção do vento, precipitação, radiação e umidade relativa. Os dados meteorológicos no Paraná foram cedidos pelo Grupo de Física Marinha do Centro de Estudos do Mar da Universidade Federal do Paraná.

Enquanto que na Bahia esses dados foram obtidos por estação meteorológica localizada na região metropolitana de Salvador, no ponto de coordenadas de latitude (-13.0053°), longitude (-38.5058°), altitude (51.41 metros). O Instituto de Gestão das Águas e Clima (INGÁ) da Bahia é o órgão responsável por sua operação e manutenção. A distância para a ECA de Sauípe é de aproximadamente 180 Km, e por isso foi considerado o mesmo. Em ambas as regiões, os ventos predominantes foram provenientes do oceano, favorecendo a concentração de aerossóis na zona costeira (OLIVEIRA, *et al.*, 2011, BRAMBILLA, 2011).

A classificação do grau de corrosividade da atmosfera seguiu os padrões da norma NBR 14643, 2001, em relação aos materiais metálicos analisados e caracteriza a atmosfera em cinco categorias de corrosividade, variando de C₁ (muito baixa) e C₅ (muito alta).

4.4 TÉCNICA DOS POTENCIAIS DE CORROSÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

O estudo teve como objetivo avaliar a relação entre a durabilidade de estruturas de concreto pré moldado (cruzetas) com traços de concreto produzidos com diferentes adições, tendo como referência valores de potencial elétrico entre as peças, quando expostas por longo período em ambientes extremamente agressivos.

Para isto foram fabricadas 20 cruzetas em concreto armado nas dimensões (11 x 11 x 190) cm, enterrados 0,5 m no solo, com furações específicas para o uso nas redes de distribuição de energia elétrica, atendendo valores característicos para resistência aos esforços de compressão e flexão definidas e padronizadas pela NBR 8451/96.

Os artefatos foram confeccionados com concreto produzido com cimento CP-V ARI, consumo de 398 kg/ m³, traço (1: 1,53: 2,1: 0,5); equivalente 100 kg de cimento:190 kg de areia: 310 kg de pedra N°1:50 L de água, acrescido das adições dosadas em (%) para relação ao peso de cimento, conforme demonstrado a seguir e mostrados na Figura 7.

- 04 cruzetas de concreto traço referência, sem adição;
- 04 cruzetas de concreto com adição de 8% de sílica ativa;
- 04 cruzetas de concreto com adição de 8% de metacaulim;
- 04 cruzetas de concreto com adição de 4,75% de borracha de pneu moída;
- e
- 04 cruzetas de concreto com adição de 1% de fibra de poliéster.



Figura 7. Moldagem das cruzetas na indústria de concreto pré moldado.

Para a definição da dosagem utilizada na produção do concreto optou-se pelo emprego de um traço padrão da empresa, tendo sido considerado como referência.

Para avaliar-se a durabilidade dos concretos estudados, optou-se por técnicas eletroquímicas. Medidas de potencial de corrosão foram realizadas periodicamente ao longo do envelhecimento, em 14 alturas, a cada 10 cm.

O equipamento para medida dos potenciais eletroquímicos consistiu, basicamente de:

- Um voltímetro de alta impedância de entrada (maior que $10\text{ M}\Omega$), com resolução de milivolts;
- Um eletrodo de referência de cobre/sulfato de cobre.
- Esponja umedecida (esponja umedecida em solução destinada a melhorar a condutividade elétrica entre o eletrodo de referência e a superfície do concreto).

A obtenção dos potenciais eletroquímicos no concreto pode ser realizada pela técnica denominada por Cascudo (1997) de dispositivo convencional, que consiste na ligação do pólo negativo do voltímetro ao eletrodo de referência e na conexão do pólo positivo do aparelho a um ponto da armadura. Neste sistema, foi necessário expor parte dessa armadura, a fim de realizar a devida conexão elétrica.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, encontram-se apresentados os resultados, com discussões relativas, alcançados no trabalho.

5.1 CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA E DADOS METEOROLÓGICOS

De acordo com os dados da estação meteorológica de Pontal do Sul, a temperatura média do ar entre os meses estudados foi de 22,1 °C, com máxima de 36,1 °C e mínima de 8,7 °C. Durante os meses de verão, a média chegou a 26,5 °C, enquanto que nos meses de inverno, foi de 17,4 °C. Os dados estão apresentados na Figura 8.

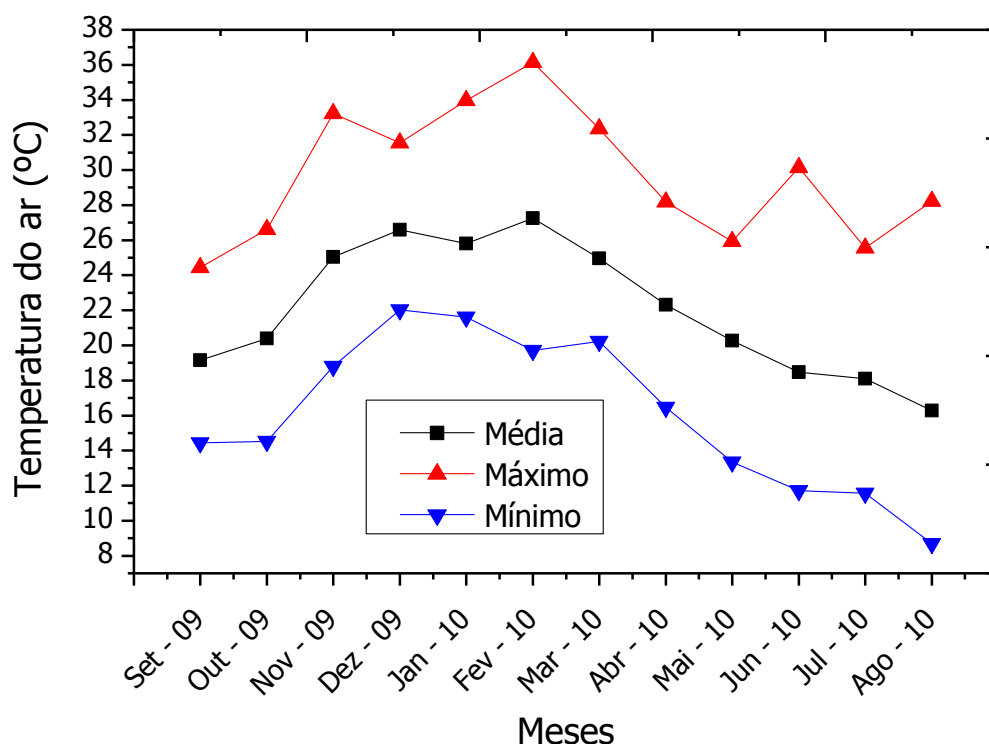


Figura 8. Temperaturas do ar médias, máximas e mínimas mensais na região de Pontal do Sul.

A média anual de precipitação foi de 0,26 mm/h, e um somatório de 2780 mm entre agosto de 2009 e agosto de 2010. O litoral paranaense não apresentou nenhum período seco durante o ano, com chuvas bem distribuídas, mas com

concentrações maiores observadas durante o verão, com uma média de 0,36 mm/h entre o início de dezembro e o meio de fevereiro, conforme demonstrado na Figura 9.

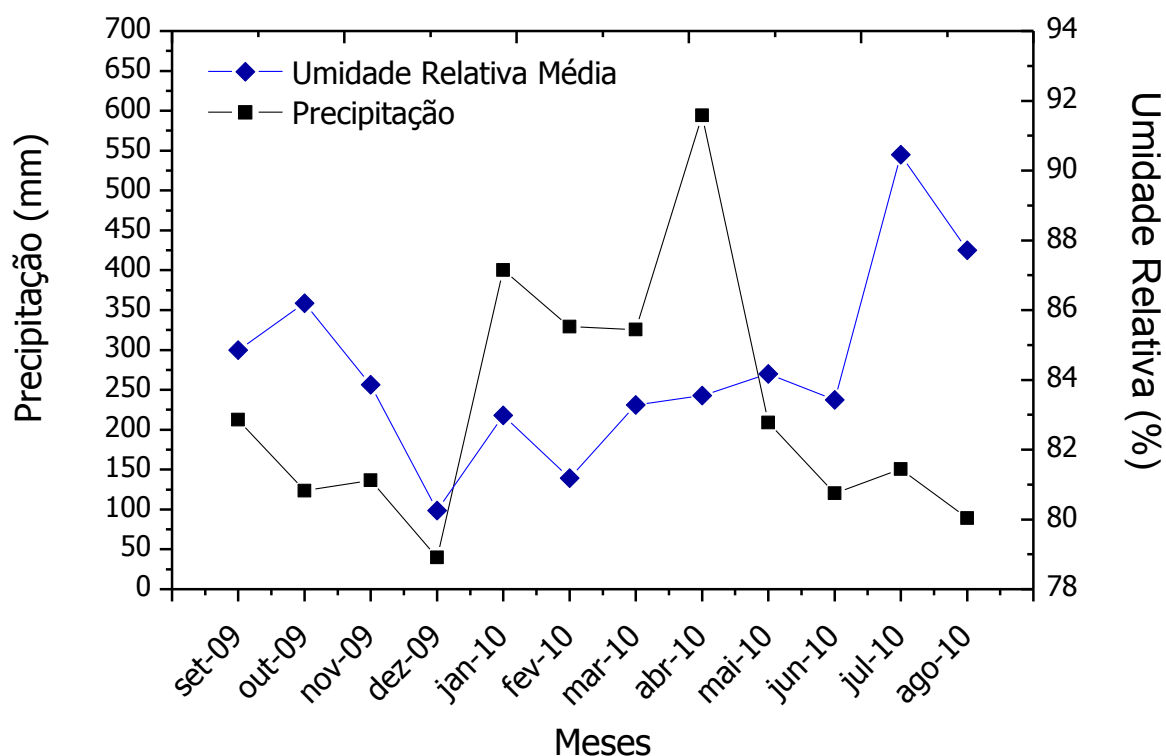


Figura 9. Precipitação acumulada, em mm, comparada com a umidade relativa média mensal, em porcentagem, no litoral paranaense.

A umidade relativa durante o período foi de, aproximadamente, 84%, com a média oscilando entre 80 e 90% entre as diferentes estações do ano. Os dados relativos a umidade estão dispostos na Figura 10. Os valores de umidade não apresentaram muita variação com a precipitação acumulada, mas se comportaram, em sua maioria, em resposta às variações da radiação, conforme pode ser visualizado na Figura 11. É possível observar que quando a radiação solar foi mais alta, no mês de julho de 2010, a umidade relativa foi a mais baixa, e vice e versa, em dezembro de 2009.

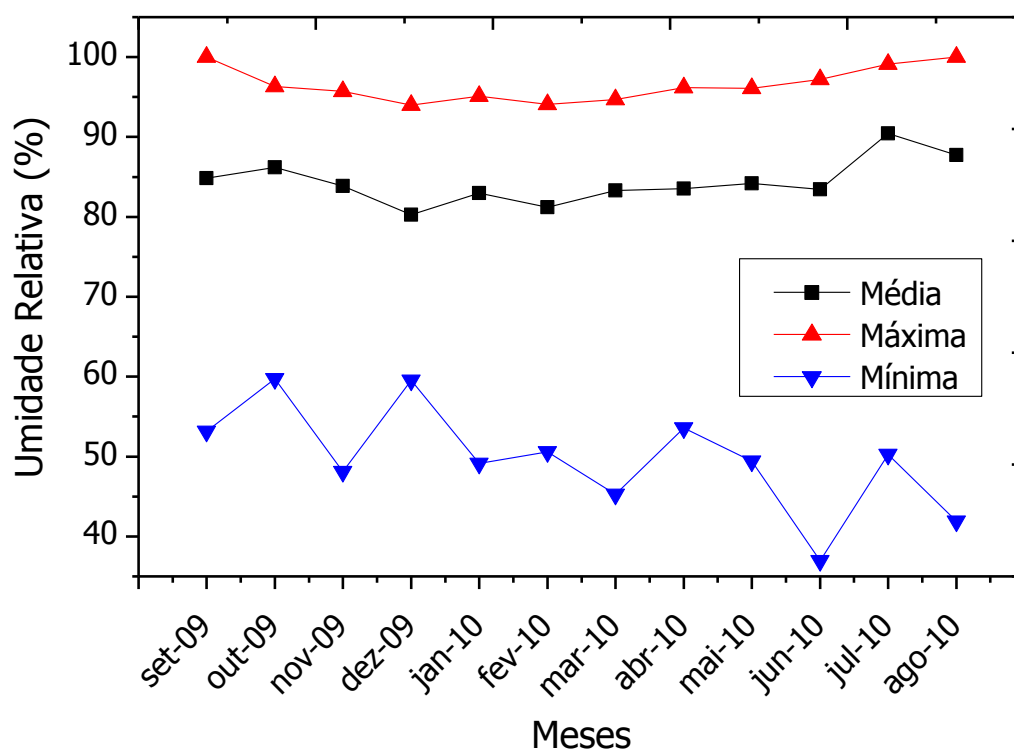


Figura 10. Umidade relativa do ar média, máxima e mínima mensais, em porcentagem, no balneário de Pontal do Sul.

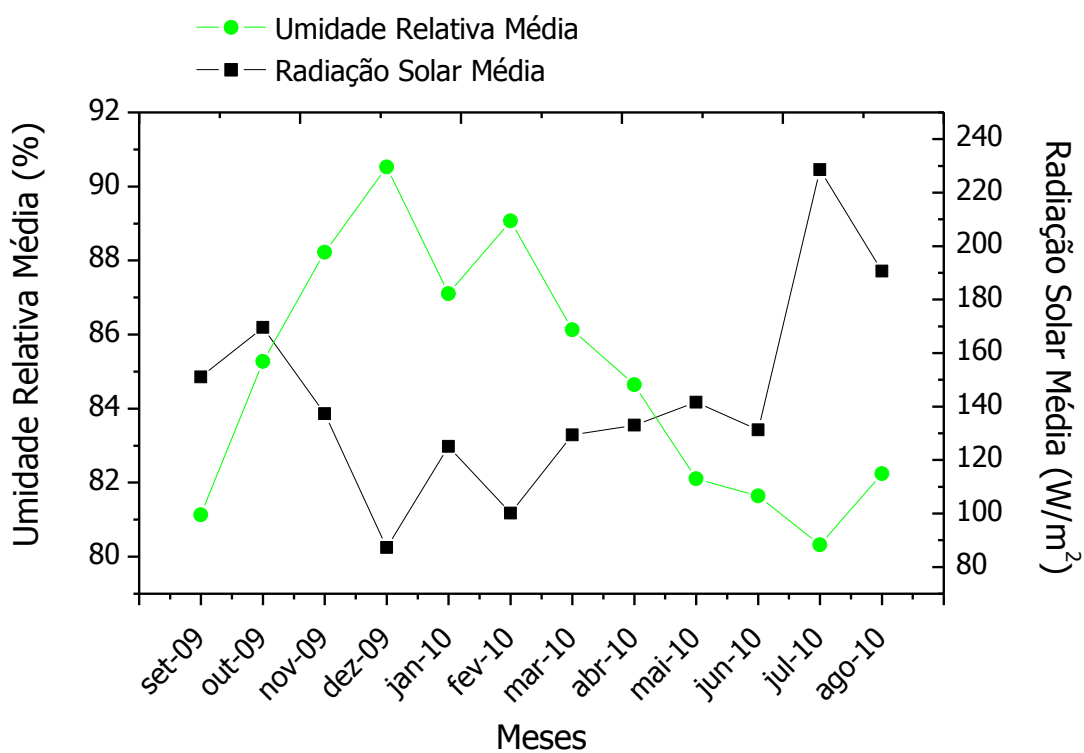


Figura 11. Umidade relativa do ar média, em porcentagem comparada com a radiação solar média, em W/m^2 , no litoral do Paraná.

A classificação baseada no Índice de Brooks aponta para uma corrosividade moderada em praticamente toda a extensão do litoral brasileiro, que inclui a região de Sauípe e Pontal do Sul, ilustrado na Figura 12. Porém, é preciso levar em conta que são agentes poluentes que imprimem aumento na velocidade de corrosão, e não são tratados nesse Índice.

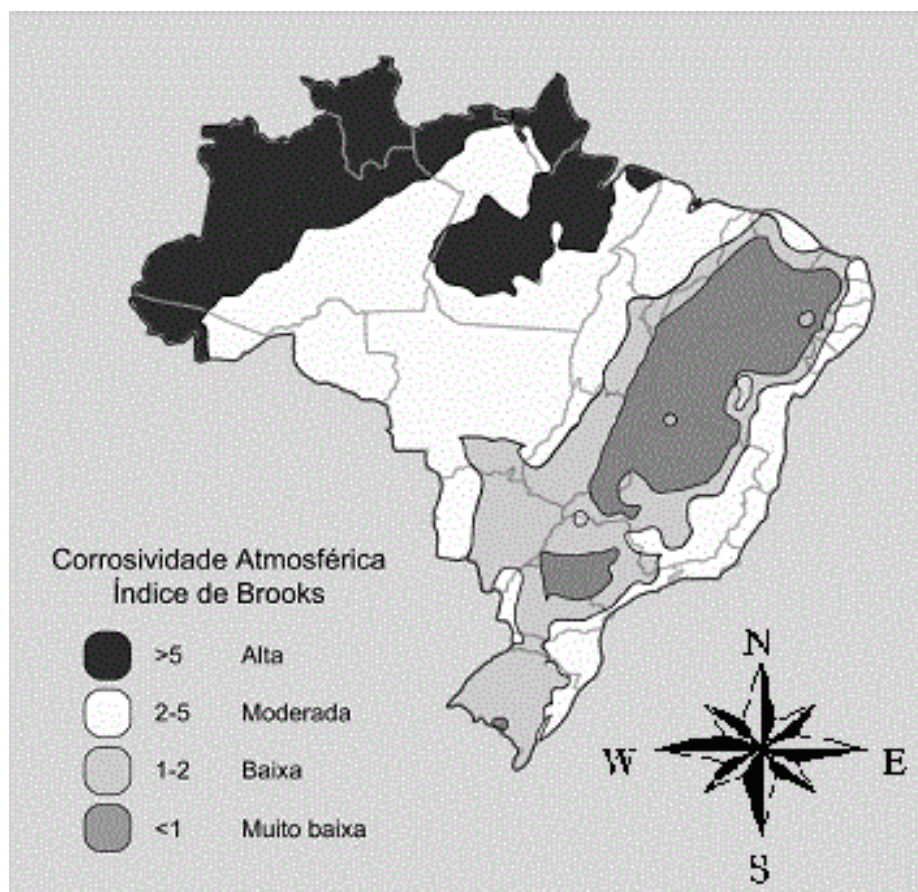


Figura 12. Mapa de Corrosividade de Brooks (SICA, 2006).

Já Salvador, de acordo com Köppen, é uma cidade de clima quente e úmido, tipicamente tropical. A temperatura média anual foi de 25,2 °C, e as temperaturas mensais comparadas com a da região sul estão dispostas na Figura 13. Nos meses de novembro de 2009 a fevereiro de 2010, as temperaturas médias em Pontal do Sul foram mais altas. Já, a umidade relativa foi consideravelmente alta, variando de 77 a 96%, com média anual na ordem de 81%. A capital baiana é uma das cidades brasileiras com maior pluviosidade anual, 2098,7 mm, conforme ilustra a Figura 14. Na Figura 15, está feita a comparação entre as precipitações em Sauípe e Pontal do Sul.

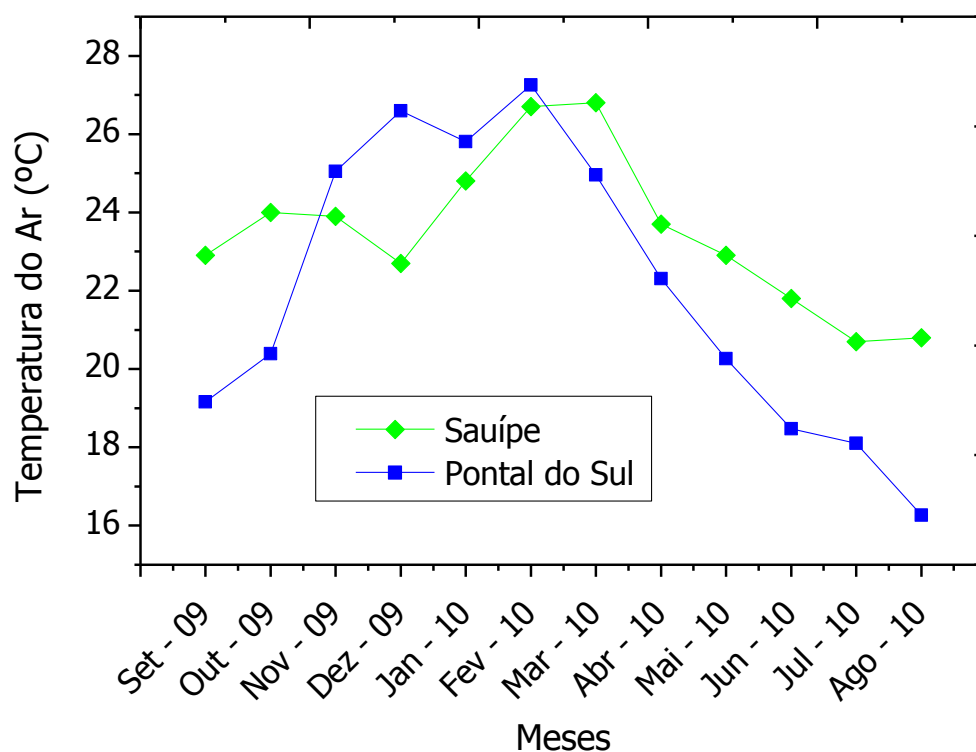


Figura 13. Temperaturas médias do ar para as regiões de Sauípe e Pontal do Sul, em °C.

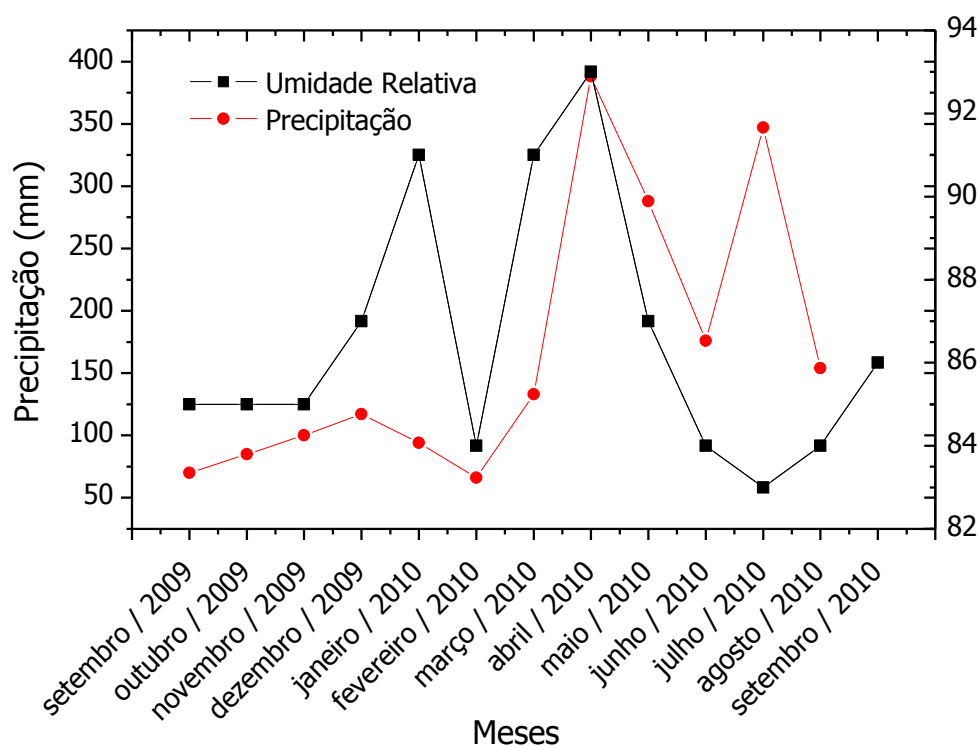


Figura 14. Precipitação acumulada mensal, em mm, e a umidade relativa média, em porcentagem, para a região de Salvador - BA.

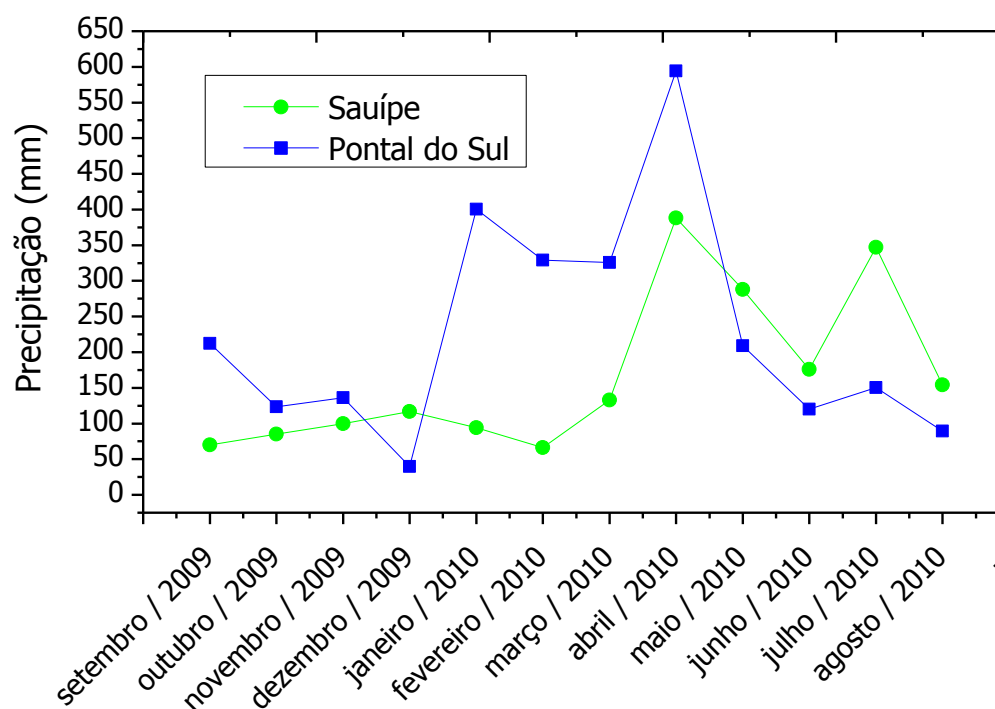


Figura 15. Precipitação acumulada mensal, em mm, para as duas regiões estudadas.

No período estudado, a radiação solar no litoral baiano foi de cerca de 2 MJ/m², e no litoral paranaense de aproximadamente 1,56 MJ/m². Esses valores são bastante importantes no tempo de superfície úmida do metal. Na Figura 16, estão apresentados os valores médios de radiação solar acumulada de Salvador – BA, entre 2008 e 2010 (BRAMBILLA, 2011).

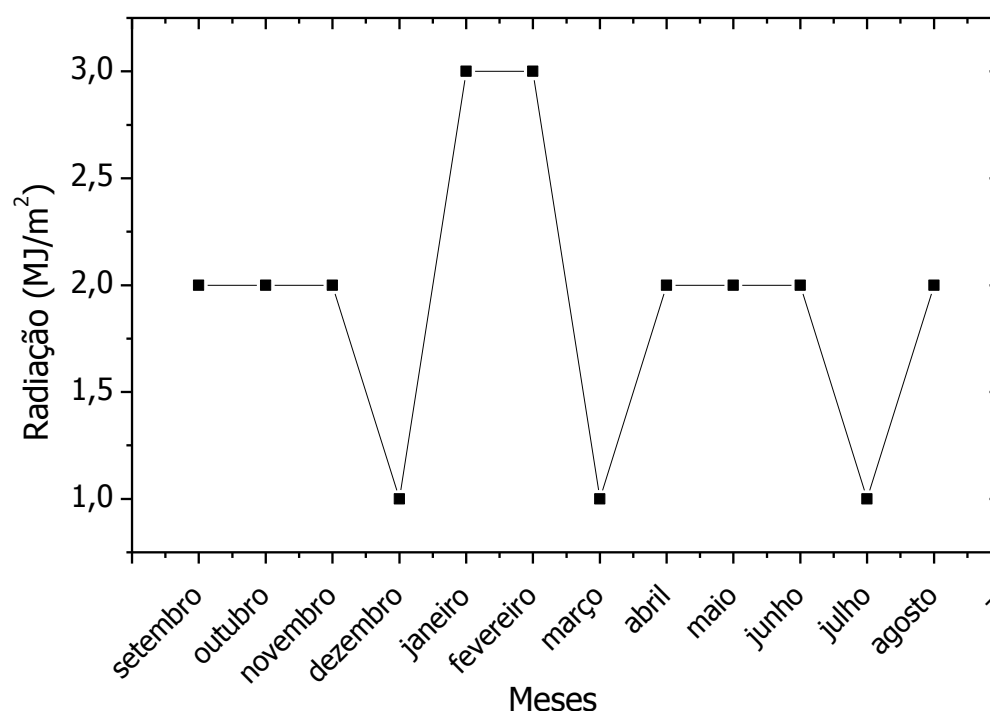


Figura 16. Radiação solar média acumulada (MJ/m²) de Salvador-BA referente ao período aproximado de setembro de 2008 à setembro de 2010 (BRAMBILLA, 2011).

O padrão de ventos também foi observado. A velocidade média observada em Pontal do Sul foi de 3,33 m/s e na região de Sauípe, de 2,2 m/s. Como a direção vai influenciar na análise, foi calculada a direção média a partir das componentes “u” e “v” dos ventos, e nos 4 primeiros meses em Pontal, foi de lés-sudeste (E-SE). No ano de 2010, o sensor da estação meteorológica não funcionou corretamente. De acordo com a literatura (MUEHE, 2006, OLIVEIRA *et al.*, 2011), os ventos com maiores velocidades são de leste, sudeste e sul. Segundo a autora, os ventos com velocidades superiores a 6 m/s, são, na maioria, provenientes de sul-sudeste. A direção predominante na região de Sauípe é de nordeste, a velocidades médias de 7 m/s. A Figura 17 ilustra a velocidade média dos ventos de Pontal do Sul e de Sauípe.

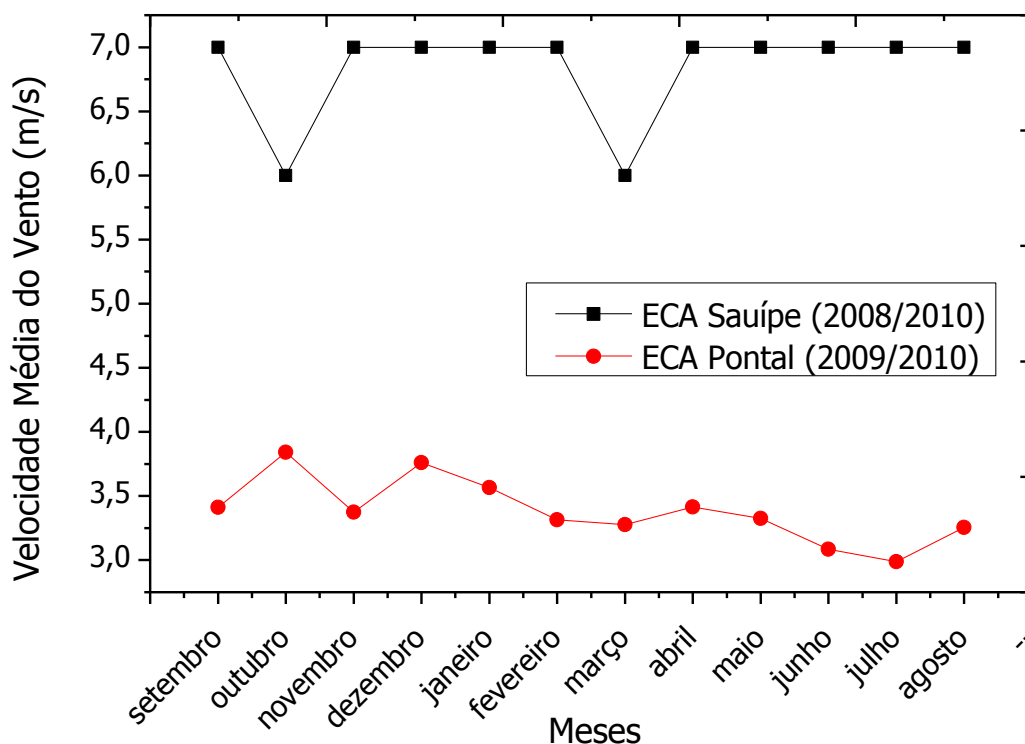


Figura 17. Velocidade média dos ventos nas duas regiões estudadas.

Com relação aos valores de I_d , Pontal do Paraná apresentou uma agressividade moderada com tendência a alta, entre 2-5, com aproximadamente 4,21. Já, a região de Salvador mostrou-se muito agressiva, com valor igual a 5,1.

5.2 MONITORAMENTO DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

5.2.1 Teor de Cloretos

Os teores de cloreto foram mais significativos do que os de sulfato, em virtude da proximidade das ECA's da orla marinha.

Em Pontal do Sul, foram coletadas 10 velas de cloreto. A concentração média anual de cloreto, expressa em $\text{mg/m}^2\cdot\text{dia}$, foi de 22,8. O maior valor observado foi nos meses de janeiro e fevereiro, chegando a $48,3 \text{ mg/m}^2\cdot\text{dia}$. O valor mínimo foi de 1,4, nos meses de junho e julho de 2010. Foi contemplado um ano de coleta, entre 28 de agosto de 2009 e 28 de agosto de 2010. De acordo com a classificação de Liesegang, com relação aos valores de cloreto, não se pode enquadrar Pontal do Sul como ambiente marinho. Algumas condições podem ter influenciado nesse resultado. A ECA de Pontal do Sul fica em uma região com baixa influência da

arrebentação das ondas, por sua proximidade com o Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP). A vasta restinga localizada na região entre o Centro de Estudos do Mar e a orla, pode ter agido como barreira natural aos íons cloreto. A Figura 18 contempla os dados médios do teor de cloretos e a precipitação média na região do litoral do Paraná.

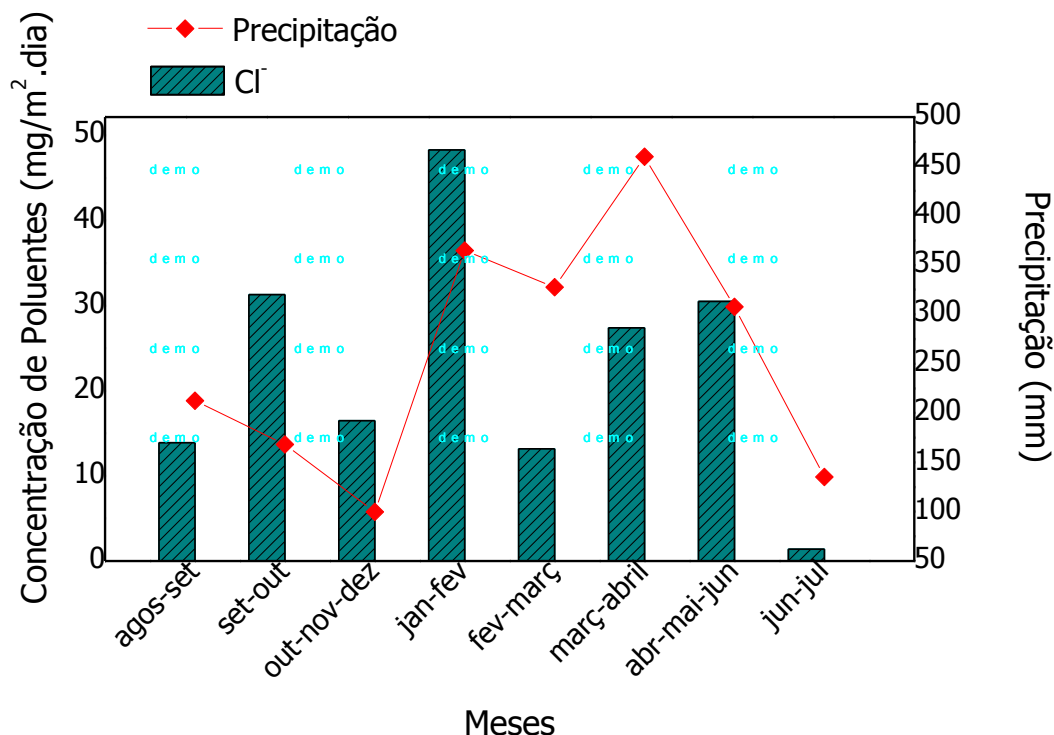


Figura 18. Teor de cloretos, em $\text{mg/m}^2.\text{dia}$, em comparação com a precipitação, em mm, na ECA de Pontal do Sul.

Na ECA da Costa do Sauípe, foram realizadas 8 coletas de velas entre os meses de outubro de 2009 e agosto de 2010, totalizando 362 dias. A média anual permitiu enquadrar o ambiente corrosivo como marinho na classificação de Liesegang, sendo de $184 \text{ mg/m}^2.\text{dia}$. O valor máximo foi igual a $514 \text{ mg/m}^2.\text{dia}$, nos meses de junho e julho de 2010, enquanto o valor mínimo foi de 29, entre fevereiro, março e abril do mesmo ano, conforme ilustrado na Figura 19. Esses valores serviram para classificar a região como ambiente marinho, já que o teor de sulfatos foi abaixo do valor limite para a sua classificação como industrial.

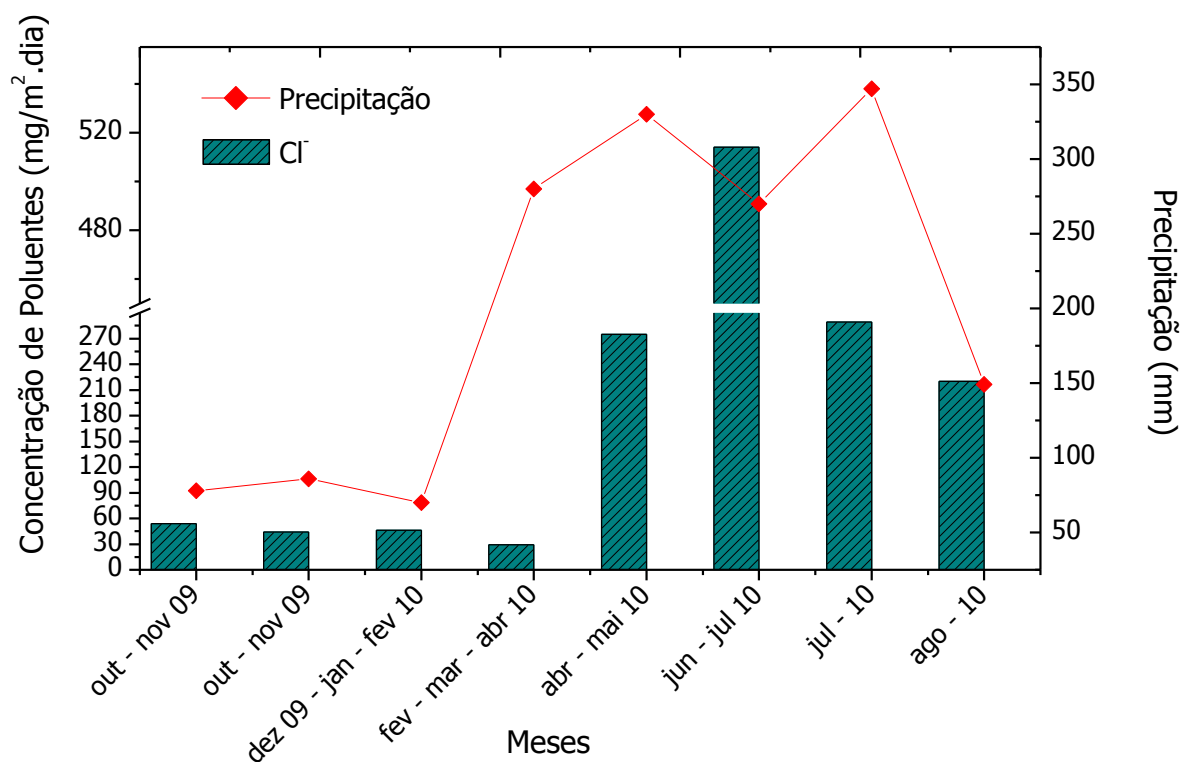


Figura 19. Teor de cloretos, em mg/m².dia, em comparação com a precipitação, em mm, na ECA de Sauípe.

Na Tabela 12, estão listados os resultados obtidos nas velas. Os valores são todos acumulados ao longo da tabela, já que os materiais retirados na última amostra tiveram influência da ação dos poluentes para todas as retiradas.

Tabela 12. Valores médios, máximos e mínimos dos íons cloreto, em mg/m².dia, acompanhado da classificação do ambiente, segundo Liesegang.

Estação	Período	Dias	Teor			Ambiente
			Médio	Máximo	Mínimo	
			mg/m².dia			
ECA Pontal do Sul	1ª Retirada	93	20,55	31,33	13,87	Rural
	2ª Retirada	169	27,48	48,28	13,87	
	3ª Retirada	296	25,9	48,28	13,2	
	4ª Retirada	365	22,8	48,28	1,4	
ECA Costa do Sauípe	1ª Retirada	116	48	54	44	Marinho
	2ª Retirada	188	273	514	29	
	3ª Retirada	320	254	514	29	
	4ª Retirada	419	83	514	29	

5.2.2 Teor de Sulfatos

Por não se tratarem de regiões industriais ou mesmo de centros urbanos com grande densidade de veículos, os teores de sulfato, expressos em função do SO₂ não foram significativos. Os resultados das velas de sulfato estão contidos na Tabela 13, contemplando o ambiente corrosivo, classificado a partir dos dados de dióxido de enxofre e da concentração de cloreto.

No litoral baiano, a média anual de concentração do dióxido de enxofre na atmosfera, após analisar as 8 velas, foi de 18 mg/m².dia. O valor máximo foi obtido nos meses de junho e julho de 2010, equivalente a 31 mg/m².dia, e o valor mínimo de 8, no último mês, como indicado na Figura 20. Junto com as concentrações de cloreto, na classificação de Liesegang, foi possível apontar o ambiente corrosivo da Costa do Sauípe como marinho, como já citado.

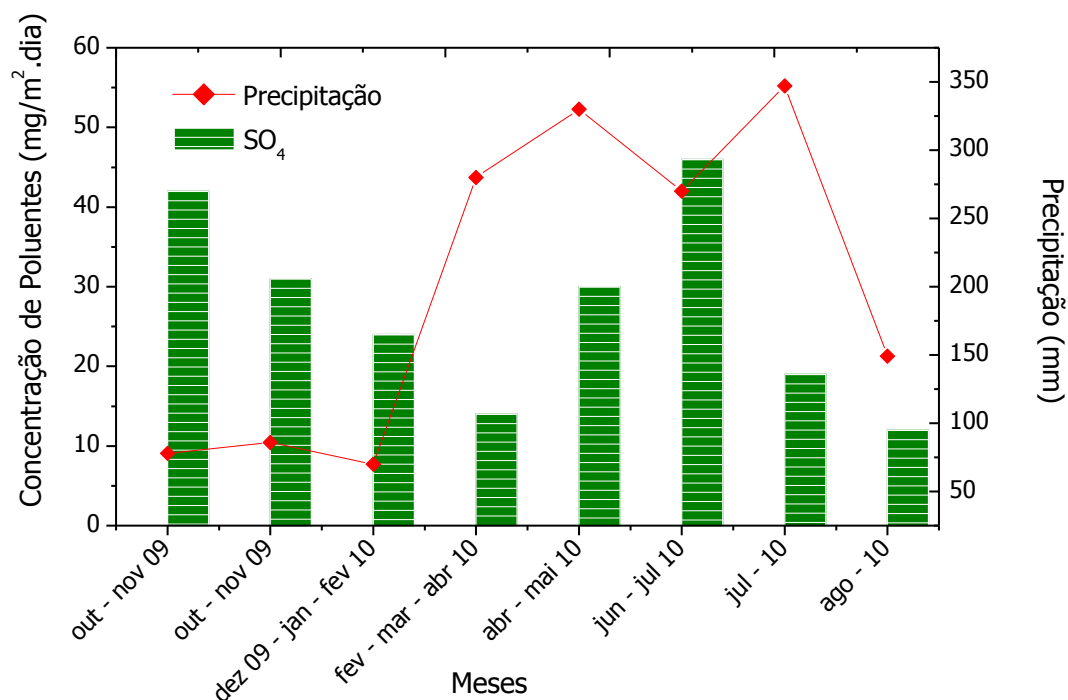


Figura 20. Teor de dióxido de enxofre, em $\text{mg/m}^2\cdot\text{dia}$, em comparação com a precipitação, em mm, na ECA de Sauípe.

Em Pontal do Sul, o valor da taxa de sulfatação baseado nas concentrações de dióxido de enxofre foi semelhante ao do nordeste. A média anual de SO_2 foi de aproximadamente $24 \text{ mg/cm}^2\cdot\text{dia}$, após cálculo com nove velas. Durante os meses de junho e julho de 2010, foi observado valor máximo, de $41 \text{ mg/m}^2\cdot\text{dia}$, e em janeiro e fevereiro do mesmo ano, foi registrado valor de $8 \text{ mg/m}^2\cdot\text{dia}$, o mais baixo, conforme disponível na Figura 21. Na classificação de Liesegang, Pontal do Sul foi considerado um ambiente corrosivo do tipo rural.

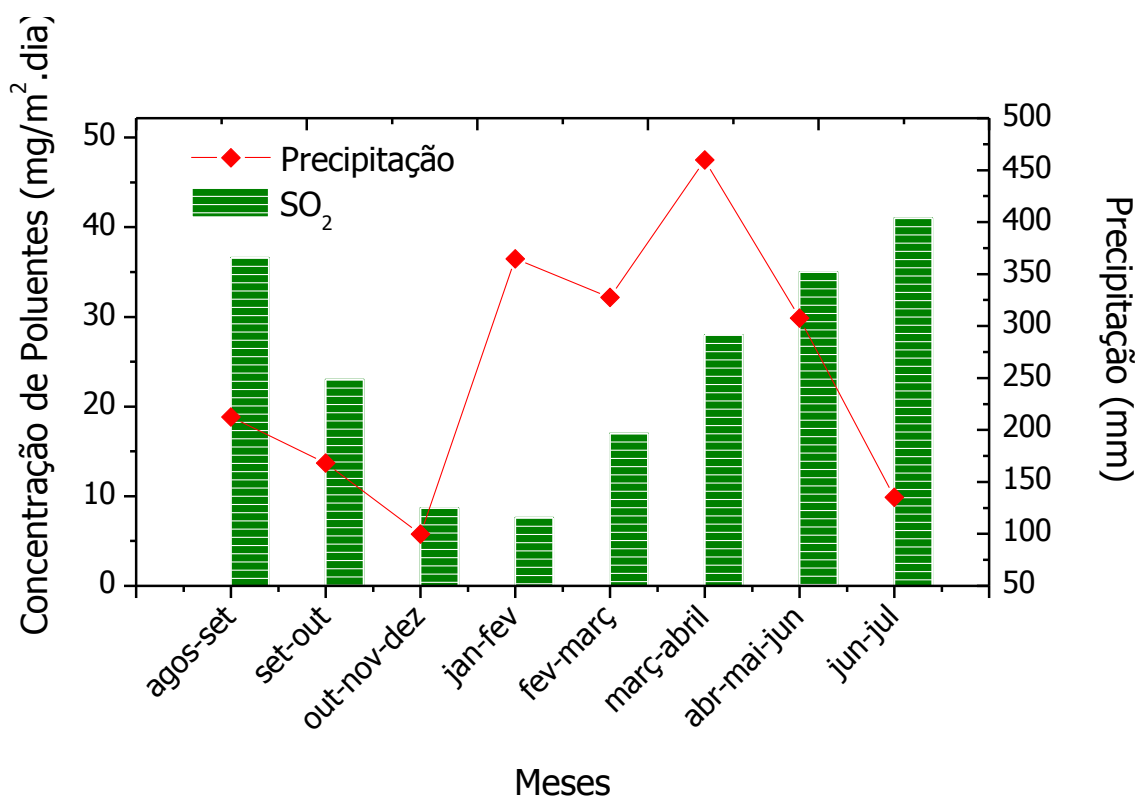


Figura 21. Teor de dióxido de enxofre, em mg/m².dia, em comparação com a precipitação, em mm, na ECA de Pontal do Sul.

Tabela 13. Valores médios, máximos e mínimos da concentração de dióxido de enxofre (SO₂), em mg/m².dia, acompanhado da classificação do ambiente, segundo Liesegang.

Estação	Período	Dias	Teor			Ambiente
			Médio	Máximo	Mínimo	
			mg/m ² .dia			
ECA Pontal do Sul	1ª Retirada	93	23	36,6	9	Rural
	2ª Retirada	169	19	36,6	7,6	
	3ª Retirada	296	22,3	36,6	7,6	
	4ª Retirada	365	24,7	41	7,6	
ECA Costa do Sauípe	1ª Retirada	116	22	28	16	Marinho
	2ª Retirada	188	15	28	10	
	3ª Retirada	320	17	31	8	
	4ª Retirada	419	3	31	3	

5.3 ENSAIOS DE INTEMPERISMO NATURAL

Neste segmento, foram apresentadas as taxas de corrosão dos materiais metálicos, fazendo as devidas comparações entre as duas áreas de estudo, e caracterizando o ambiente após a exposição dos materiais durante um ano.

5.3.1 Alumínio

Na Tabela 14 estão contemplados os resultados obtidos após a exposição do alumínio ao intemperismo natural, nos litorais paranaense e baiano. Esse material tem tendência a ter ataques localizados, os chamados pites, quando em zonas costeiras, pelo caráter higroscópico dos íons cloreto. A perda de massa no primeiro ano de exposição permitiu classificar o grau de corrosividade de uma atmosfera, variando de C_1 , muito baixa, a C_5 , muito alta.

Com a limpeza dos corpos de prova no laboratório antes da exposição, os óxidos de alumínio que protegem as placas dos íons atmosféricos podem ter sido retirados e até que essa camada passivante voltasse a se formar, houve uma grande perda de massa, associada a uma corrosão generalizada. Como foi observado na terceira retirada em Pontal, houve um valor diferenciado dos demais e da ordem de $9,6 \mu\text{m/ano}$, não caracterizando uma degradação puntiforme. Mesmo na região de São Luiz, no Maranhão, que tem uma atmosfera rica em cloretos, o valor mais alto encontrado foi de $4,7 \mu\text{m/ano}$, após cinco meses de exposição (SICA, 2006).

É possível observar a proteção que a camada passivadora confere ao alumínio nos dados referentes à ECA da Costa do Sauípe. Os valores de taxas de corrosão diminuíram conforme aumentou o tempo de exposição do material na atmosfera, mesmo com o aumento da concentração dos íons cloreto. De outubro de 2009 a abril de 2010, o teor médio de cloreto foi $43 \text{ mg/m}^2.\text{dia}$, enquanto que a partir de abril até agosto, essa média passou para $324 \text{ mg/m}^2.\text{dia}$. Esse aumento pode ser consequência da precipitação, que apresenta uma sazonalidade nesse período.

Na Figura 22, encontra-se apresentado o gráfico dos valores obtidos para a taxa de corrosão do alumínio, nas duas ECA's trabalhadas e no período de 2009 a 2010.

Tabela 14. Taxa de corrosão e categoria de corrosividade atmosférica para o alumínio nas duas regiões.

Estação	Código	Tempo de	Taxas de		Classificação
		Exposição Dias	Corrosão $\mu\text{m}/\text{ano}$	$\text{g}/\text{m}^2.\text{ano}$	
ECA Pontal do Sul	A1	93	1,877	5,067	C5
	A2	169	0,517	1,396	
	A3	296	9,260	25,002	
	A4	365	4,896	13,220	
	Valor médio		4,137	11,171	
ECA Costa do Sauípe	A1	116	2,255	6,088	C4
	A2	188	2,090	5,643	
	A4	320	0,681	1,839	
	A3	417	0,209	0,564	
	Valor médio		1,309	3,534	

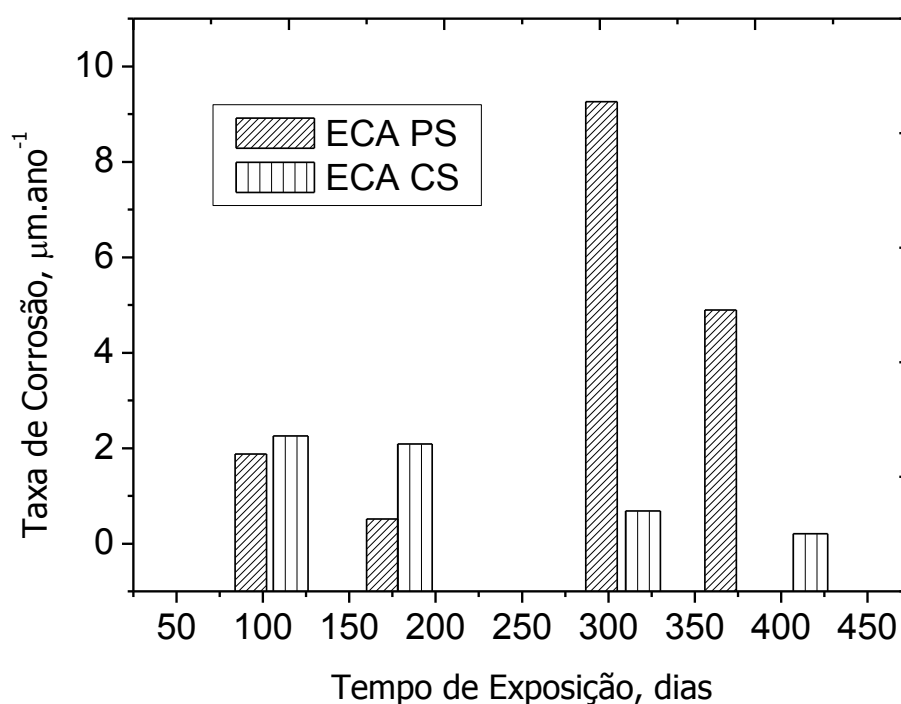


Figura 22. Comparação das taxas de corrosão do alumínio em função do tempo.

5.3.2 Cobre

O cobre foi o único material analisado que degradou mais, em média, na região nordeste que na região sul. As taxas de corrosão, bem como a classificação de acordo com a perda de massa após o primeiro ano de exposição estão dispostas na Tabela 15.

Tabela 15. Taxa de corrosão e categoria de corrosividade atmosférica para o Cobre nas duas regiões.

Estação	Código	Tempo de Exposição Dias	Taxas de Corrosão $\mu\text{m/ano}$	Classificação	
				$\text{g/m}^2.\text{ano}$	
ECA Pontal do Sul	CB1	93	2,536	22,726	C4
	CB2	169	1,631	14,615	
	CB3	296	2,797	25,059	
	CB4	365	2,484	22,255	
	Valor médio		2,362	21,164	
ECA Costa do Sauípe	CB1	116	4,554	40,800	C5
	CB2	188	4,795	42,966	
	CB4	320	2,214	19,840	
	CB3	417	1,736	15,555	
	Valor médio		3,325	29,790	

Observou-se que mesmo com o aumento dos teores de cloreto, houve uma diminuição da perda de massa do cobre no litoral baiano, a partir da segunda retirada. A agressividade do ambiente foi muito alta para este metal, sendo em média maior que a degradação observada para o alumínio, ultrapassando os limites estabelecidos pela norma (BRAMBILLA, 2011). A mesma consideração sobre o processo de limpeza dos corpos de prova de alumínio, pode ser utilizada neste caso, onde houve remoção da camada de óxido aderida na superfície dos mesmos. Depois de formada a camada passivante na superfície do material, mesmo com o

aumento dos poluentes atmosféricos, que ocorreu em Sauípe, a resistência do metal foi maior.

Em Pontal do Sul, a degradação do cobre foi menor nos meses de verão, talvez pela maior concentração de chuvas, que age “lavando” os íons da superfície do metal. Foi o material que em média menos degradou no litoral paranaense dentre os quatro estudados, sendo assim o mais adequado, após um ano de exposição. A classificação da agressividade resultante foi C₄, classificada como alta. Na Figura 23, estão apresentadas as taxas de corrosão nas duas ECA's, na qual pode ser analisado o efeito da passivação, principalmente na Costa do Sauípe, pela diminuição da taxa de corrosão propriamente dita ao longo do período de exposição do metal ao meio.

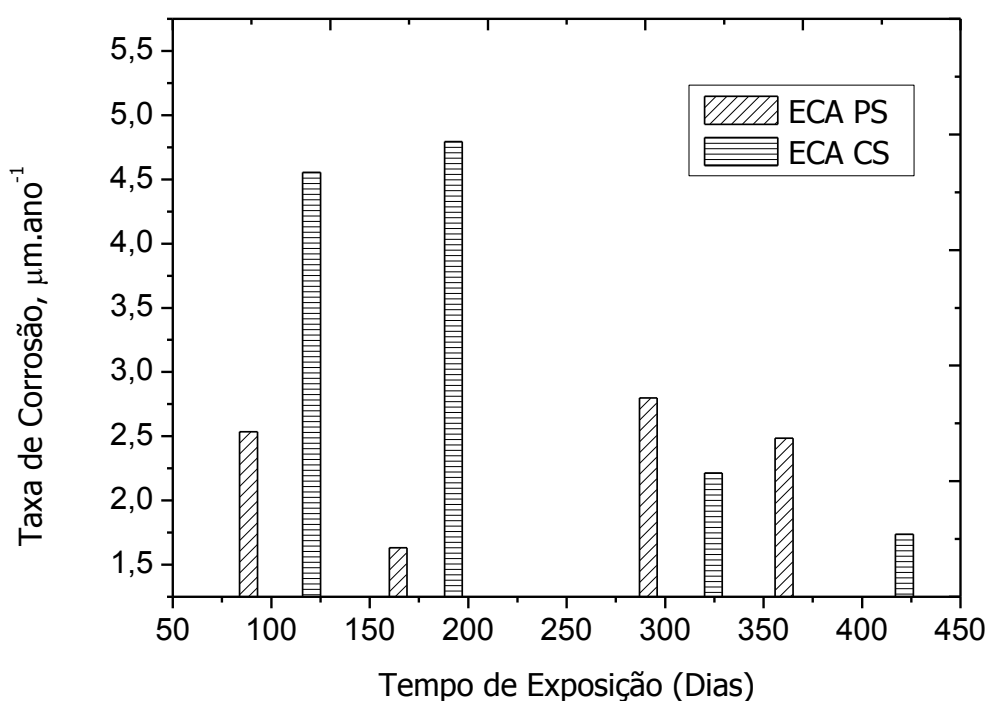


Figura 23. Comparação das taxas de corrosão do Cobre em função do tempo.

5.3.3 Aço Carbono

A degradação atmosférica do aço carbono depende principalmente do tempo de superfície úmida, ou da temperatura e umidade relativa, além de depender dos poluentes da atmosfera, que aceleram o processo. Em ambientes mais agressivos, há uma grande tendência de formação de produtos de corrosão que passivam o

material após o 14^o mês de exposição, conforme observado na Colômbia, país tropical da América Latina (CASTAÑO *et al.*, 2010). Na região de Sauípe, foi observada redução na taxa de corrosão a partir da terceira retirada, possivelmente pela proteção gerada pela camada de óxido superficialmente aderida ao metal. Na Figura 24 está apresentado o gráfico resultante das medidas das taxas de corrosão do metal.

A agressividade C₅ para o ambiente de Pontal do Sul foi considerada alta se tratando de uma região classificada como rural. Na Espanha, na região de Jinámar, subtropical, em um ambiente marinho industrial, a degradação do aço carbono chegou apenas a C₄, com os resultados apontando como principal fator a concentração de íons cloreto (RODRIGUEZ *et al.*, 2003). Em pesquisa de corrosão atmosférica no Vietnã, em locais expostos sem abrigo para os CP's, foi visto que a perda de massa do aço carbono não pode ser explicada pelas concentrações de SO₂ e cloretos, não sendo encontrado fator específico que explicasse o processo (LAN *et al.*, 2006). Na Tabela 16, foram reunidos os dados obtidos em ambas as ECA's para efeito de comparação de valores.

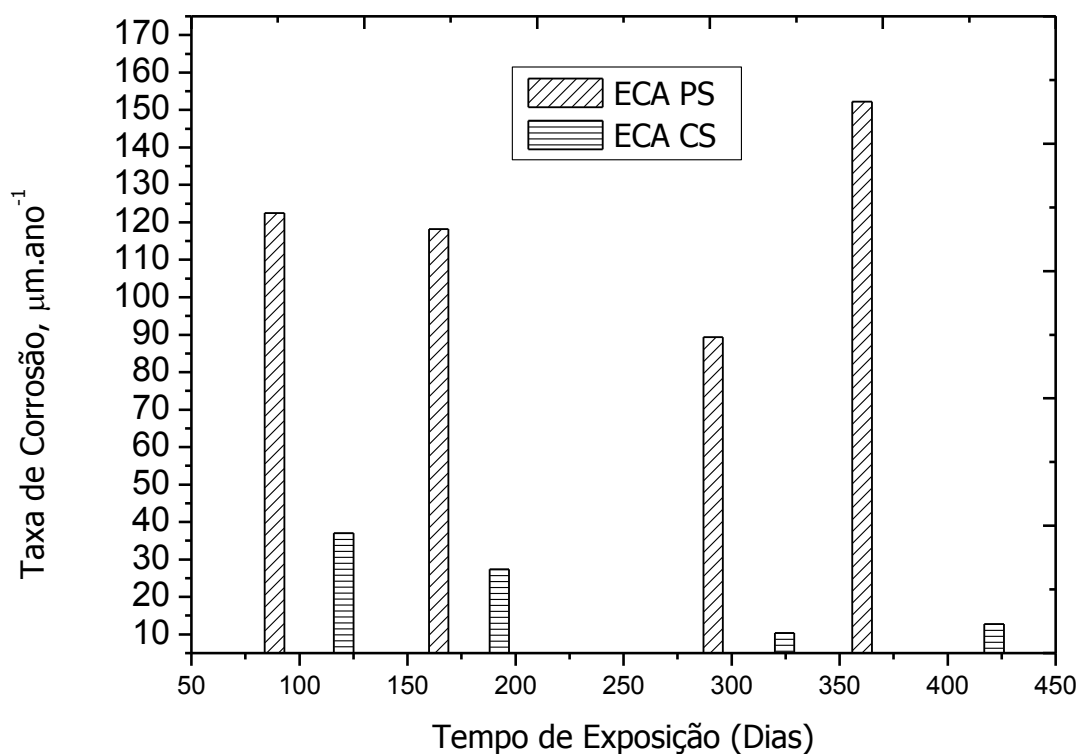


Figura 24. Comparação das taxas de corrosão do Aço Carbono em função do tempo.

Tabela 16. Taxa de corrosão e categoria de corrosividade atmosférica para o Aço Carbono nas duas regiões.

Estação	Código	Tempo de	Taxas de		Classificação
		Exposição Dias	Corrosão $\mu\text{m/ano}$	$\text{g/m}^2.\text{ano}$	
ECA Pontal do Sul	C1	93	122,436	963,569	C5
	C2	169	118,203	930,255	
	C3	296	89,346	703,151	
	C4	365	152,185	1197,694	
	Valor médio		120,542	948,667	
ECA Costa do Sauípe	C1	116	37,059	291,654	C2
	C2	188	27,339	215,158	
	C3	320	10,417	81,982	
	C4	419	12,786	100,622	
	Valor médio		21,900	172,354	

5.3.4 Aço Galvanizado

A proteção que a camada de zinco oferece ao aço carbono é de grande eficácia para o aumento do tempo de vida do material. Na Bahia, o aço galvanizado foi o segundo material que em média mais resistiu à corrosão da atmosfera, ficando atrás apenas do alumínio. Em Pontal do Sul, o aço galvanizado teve menor perda de massa que o alumínio, ficando atrás apenas do cobre. Na Tabela 17, estão mostrados os valores comparando as duas regiões.

Tabela 17. Taxa de corrosão e categoria de corrosividade atmosférica para o aço galvanizado nas duas regiões.

Estação	Código	Tempo de	Taxas de	Classificação	
		Exposição Dias	Corrosão $\mu\text{m/ano}$		
ECA Pontal do Sul	D1	93	5,700	44,860	C4
	D2	169	3,654	28,755	
	D3	296	2,577	20,282	
	D4	365	1,048	8,252	
	Valor médio		3,245	25,537	
ECA Costa do Sauípe	M1	116	2,568	20,207	C3
	M2	188	2,063	16,239	
	M4	320	0,927	7,292	
	M3	417	1,846	14,530	
	Valor médio		1,851	14,567	

A classificação do ambiente em Pontal do Sul foi de agressividade alta (C_4), e média (C_3) no nordeste. Na literatura, existem pesquisas que mostram que a degradação do zinco está fortemente ligada à presença ou não da umidade, existindo ambientes rurais que apresentam taxas maiores que pólos industriais, conforme observado em Cuba. Os produtos de corrosão do zinco, principalmente formados a partir dos sulfatos, são solúveis em água, e a chuva é bastante importante por agir na lavagem da superfície das placas. As taxas de corrosão para materiais expostos e materiais com abrigo, mostraram que o abrigo causa maior perda de massa (MENDOZA e CORVO, 2000).

Um padrão que pode ser observado na Figura 25 é a tendência característica da maior parte dos materiais expostos aos ensaios de intemperismo natural, que é o decaimento das taxas de corrosão ao longo do tempo (MENDOZA e CORVO, 2000). Isso não indica que a degradação vai diminuir ao longo do tempo, mas mostra que

pode haver uma diminuição da sua taxa de corrosão, porém, tal fato não evita a perda de suas propriedades, principalmente, mecânicas.

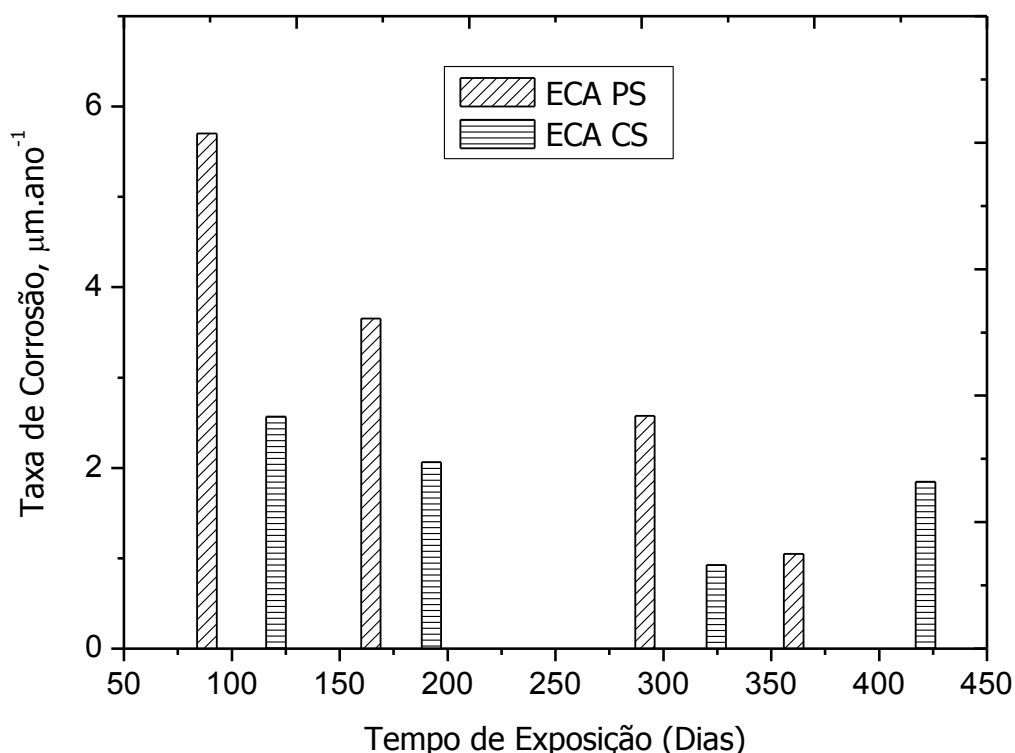


Figura 25. Comparação das taxas de corrosão do aço galvanizado em função do tempo.

Na Tabela 18, estão apresentadas as taxas de corrosão observadas nos ensaios de intemperismo para cada um dos materiais, após um ano de exposição, de acordo com a norma ABNT NBR 14643. As taxas de corrosão estimadas, considerando a norma ISO 9223, em que Pontal e Sauípe têm tempo de superfície úmida t_4 e, também, fundamentado no teor de cloreto e sulfato, também estão comparadas na tabela.

Tabela 18. Taxas de corrosão observadas e estimadas, de acordo com as normas técnicas, para os metais-padrão.

Estação	Metal-Padrão	Corrosividade Ambiental	
		Estimada (NBR 14643)	Observada (ISO 9223)
ECA Pontal do Sul	Alumínio	C ₃	C ₅
	Cobre	C ₃	C ₄
	Aço Carbono	C ₃	C ₅
	Aço Galvanizado	C ₃	C ₄
ECA Costa do Sauípe	Alumínio	C ₃ -C ₄	C ₄
	Cobre	C ₄	C ₅
	Aço Carbono	C ₄	C ₂
	Aço Galvanizado	C ₄	C ₃

De acordo com as categorias estimadas para o litoral paranaense, é possível observar que no campo os materiais não se comportaram de tal maneira. Isso pode ser explicado pela limpeza dos CP's antes da exposição, em que foram removidos os produtos de corrosão que são responsáveis pela passivação das placas de alguns dos metais trabalhados. A proximidade da ECA com uma estrada não asfaltada também pode ter influenciado nos resultados. A poeira levantada na passagem de automóveis deve conter sílica, que também são íons higroscópicos, que podem acelerar o processo de degradação dos materiais.

Na região nordeste, o resultado obtido no alumínio foi de acordo com o estimado pela norma. Para os outros materiais, houve discrepâncias. Para o cobre, a classificação estimada não foi observada durante o primeiro ano de exposição. Porém, esse material apresenta produtos de corrosão muito insolúveis, que levam ao decaimento das taxas de corrosão ao longo do tempo, chamadas pátinas. Já, para o aço galvanizado e o aço carbono, eram esperadas perdas de massa maiores do que as que foram obtidas em campo, especialmente para o aço carbono, que teve uma classificação baixa (C₂).

A comparação das taxas de corrosão nas duas estações de intemperismo pode ser visualizada na Figura 26.

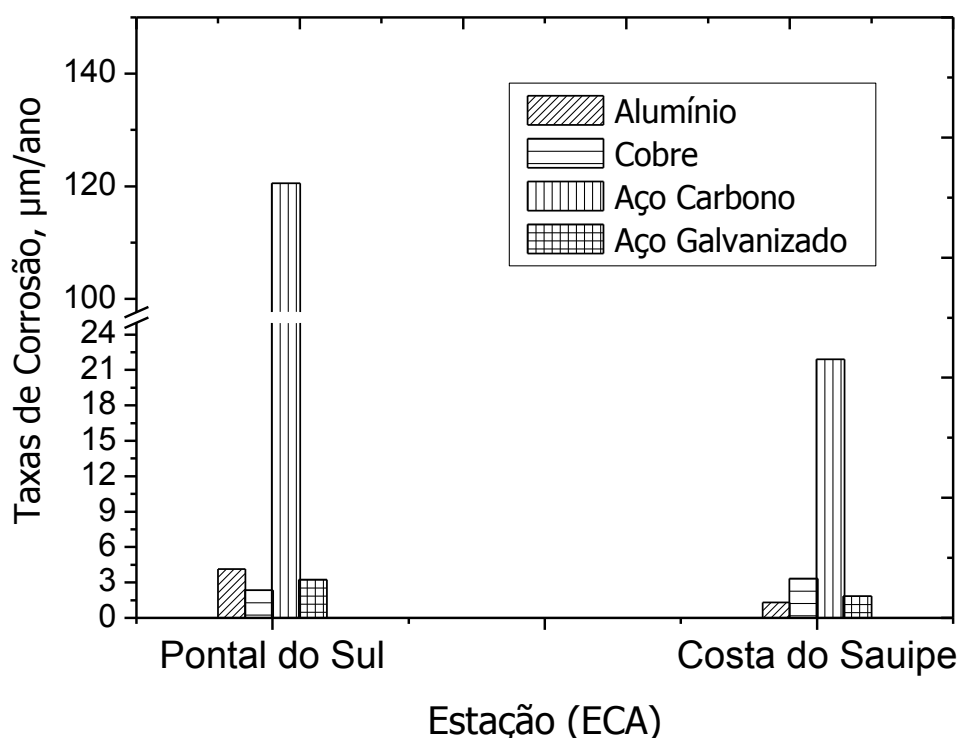


Figura 26. Comparação entre taxas médias de corrosão dos metais-padrão para as duas estações de intemperismo natural, após um ano de exposição.

Finalmente, é importante ressaltar que não foram amostradas as partículas sedimentáveis da atmosfera, que podem agir de forma a acelerar a cinética dos processos de degradação. Estatisticamente seriam necessárias mais retiradas de cada material a cada três meses, a fim de se obter uma média e desvio padrão das taxas de corrosão.

5.4 AVALIAÇÃO DOS POTENCIAIS DE CORROSÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO

Os potenciais de corrosão foram acompanhados durante cerca de um ano e meio após a exposição das cruzetas, e continuam a ser monitoradas, tanto na região da Bahia quanto em Pontal do Paraná, conforme ilustrado nas Figuras 27 e 28. Por se tratar de um método qualitativo, esse período de tempo não foi suficiente para inferir quais corpos de prova se comportaram melhor. A tendência é que os potenciais comecem a aumentar primeiro mais próximo ao solo, pelo teor de

umidade. Este padrão foi observado nos CP's de fibra polimérica, no litoral paranaense e nos de metacaulin, em Sauípe.

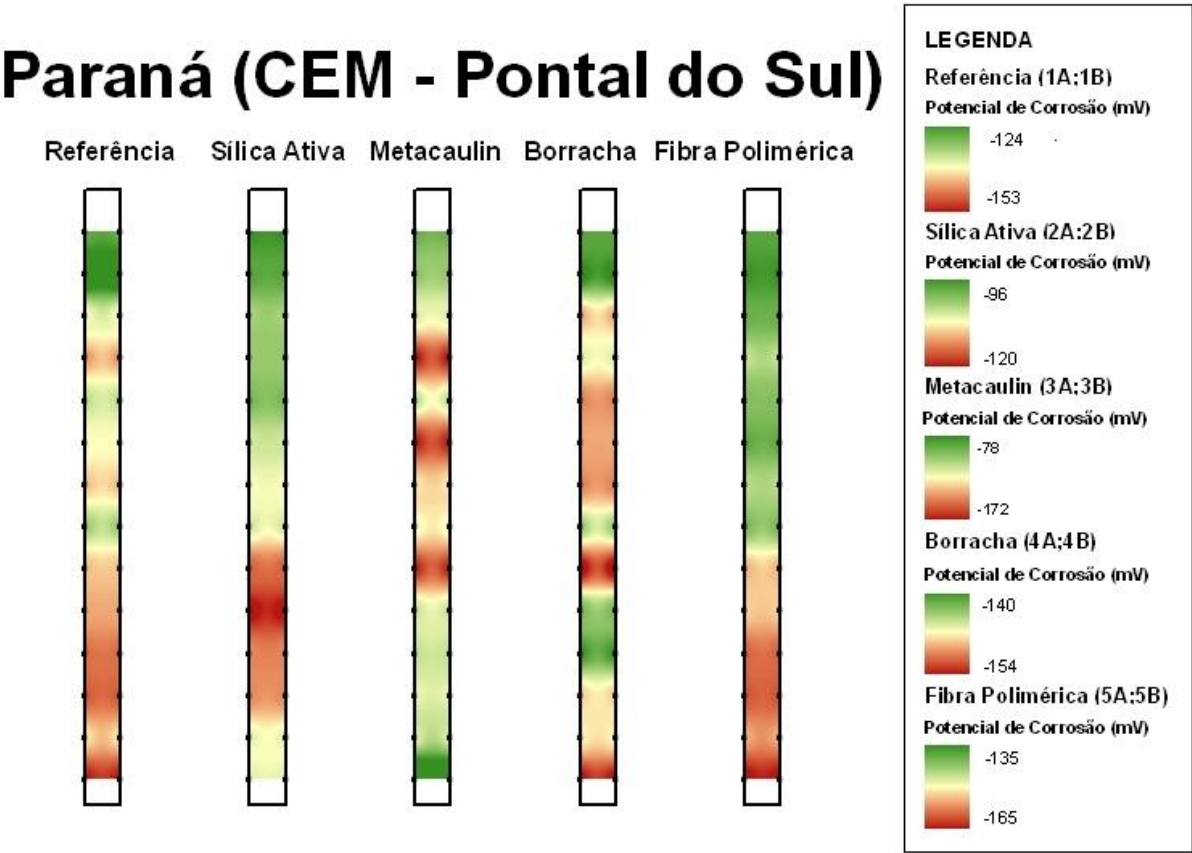


Figura 27. Potencial de corrosão dos CP's instalados na ECA de Pontal do Sul, no período de agosto de 2008 a agosto de 2009.

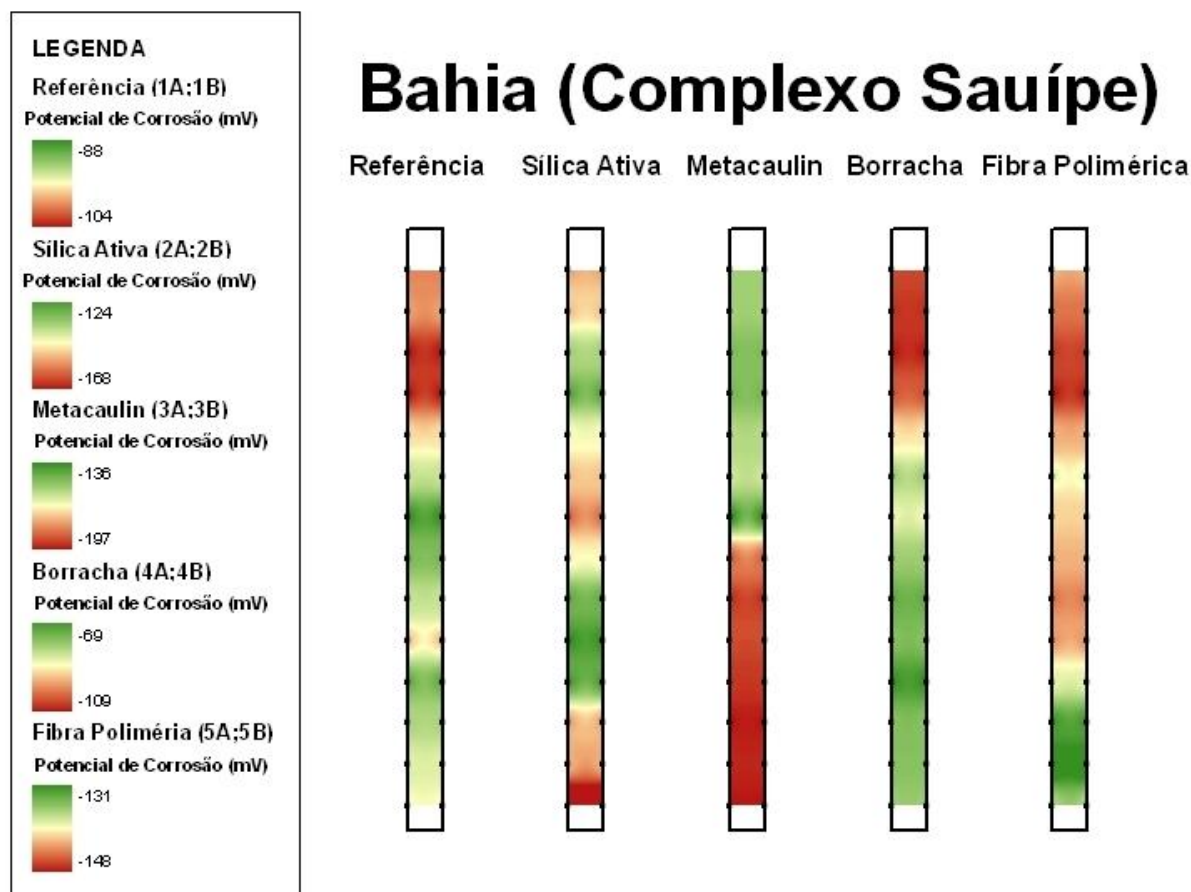


Figura 28. Potencial de corrosão dos CP's instalados na ECA de Sauípe, no período de agosto de 2008 a agosto de 2009.

De acordo com as medidas realizadas nas duas ECA's, os CP's continuam em um estado passivo de corrosão, com os valores oscilando entre 0 e -200 mV. A partir do instante que a corrosão passa a ocorrer, ou sua probabilidade de estar ocorrendo é maior, os valores de potencial vão variar de -200 mV a -350 mV, quando há probabilidade incerta de corrosão, e acima de -350 mV, para uma probabilidade de corrosão de 90% (ASTM C 876, 1999).

Na Figura 29, encontra-se apresentado, a título de ilustração, um gráfico referente ao potencial de corrosão da armadura de uma cruzeta com concreto referência (sem adições), exposta na ECA Pontal do Sul no período de 1 ano. Observou-se, conforme comentado, pouca ou nenhuma probabilidade de corrosão, segundo preconizado pela norma ASTM C 876, 1999.

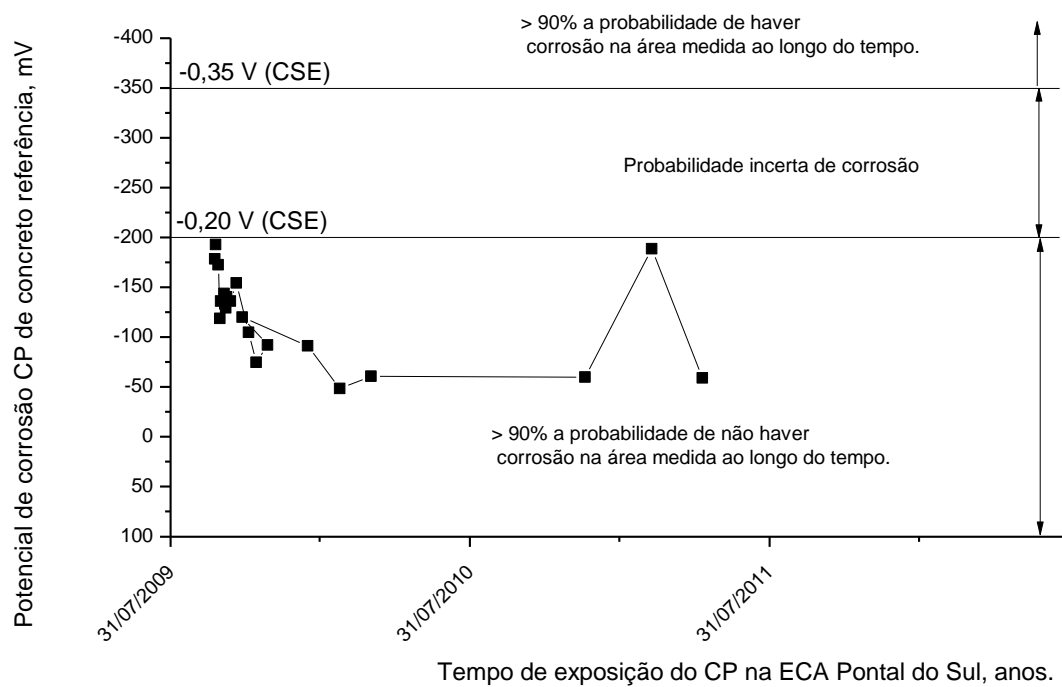


Figura 29. Potencial de corrosão de um CP padrão de concreto referência, instalado na ECA de Pontal do Sul, no período de agosto de 2008 a agosto de 2009.

6 CONCLUSÕES

A partir das taxas de corrosão dos metais padrão – alumínio, cobre, aço carbono e aço galvanizado – após um ano de exposição em duas Estações de Corrosão Atmosférica foi possível determinar a corrosividade ambiental do ambiente de Pontal do Sul, no Paraná e de Sauípe, na Bahia. No litoral paranaense foi observada agressividade muito alta para o aço carbono e o alumínio (C₅) e alta (C₄) para cobre e aço galvanizado. A corrosividade estimada baseada no tempo de superfície úmida, teor de cloretos e de sulfatos indicou, por sua vez, agressividade moderada (C₃). Na região da Costa do Sauípe, apenas o alumínio se comportou conforme estimado pela norma técnica NBR 14643, apresentando corrosividade alta (C₄). O cobre após a exposição teve perdas de massa equivalentes a ambientes de agressividade muito alta (C₅), o aço carbono, como baixa (C₂), e o aço galvanizado, moderada (C₃).

A atmosfera da região da ECA de Pontal mostrou-se mais agressiva para três dos quatro metais expostos, haja vista que na média das taxas de corrosão das quatro placas retiradas de cada metal, somente o cobre perdeu mais massa na Bahia do que no Paraná. Tal comportamento pode ter sido resultante do tráfego na avenida não asfaltada e que fica distante a menos de 50 m da respectiva ECA, com levantamento de poeira (argila, sílica e, também, sais de cloreto).

Os cálculos do Índice de Brooks mostraram uma tendência de degradação moderada a alta para a região de Pontal do Paraná, observada nas taxas de corrosão dos metais, e muito alta para Sauípe, que só foi verificada nos corpos de prova de cobre. A análise dos dados meteorológicos apontou para altos teores de umidade em ambas as estações, que vão favorecer os processos de degradação. A direção predominante dos ventos foi do mar em direção a costa, que favoreceu para aumentos nas concentrações de íons cloretos. O clima na região metropolitana de Salvador caracterizou-se por duas estações bem definidas, a de estiagem, de setembro a março, e a de chuvas, de abril a agosto. Já, no litoral do Paraná, não existiu duas estações bem definidas, com precipitações bem distribuídas ao longo do ano, com período mais chuvoso no verão.

O material que apresentou, em média, as menores taxas de corrosão na região Sul foi o cobre, seguido por aço galvanizado e alumínio. Já, no nordeste, o alumínio foi o que mais resistiu, em média, aos poluentes da atmosfera, com melhor desempenho que aço galvanizado e cobre, respectivamente. Cabe destacar, que não foi avaliado na região sul a corrosão por pites, sendo que no litoral baiano, esta foi significativa para o alumínio (BRAMBILLA, 2011).

O aço carbono foi o que mais teve perda de massa em ambas as regiões, com destaque para Pontal do Sul, onde a corrosão foi mais alta que a observada em ambientes marinho-industriais de regiões subtropicais, como na Espanha, por exemplo, na estação de Jinámar.

Os teores de cloreto e de sulfato permitiram classificar, de acordo com Liesegang, a região de Sauípe como ambiente marinho, de agressividade C_4 , e Pontal do Sul como rural, com agressividade C_1 . Pela proximidade da orla, os íons cloreto foram mais significativos que os íons sulfatos, característicos, principalmente, de regiões industriais.

Com relação às cruzetas de concreto armado, e seus aditivos, nada se pôde inferir na pesquisa, já que o método eletroquímico utilizado é qualitativo e não permitiu prever o tempo de vida útil das estruturas, mas somente se os CP's já passaram para o estado ativo de corrosão. Após um ano e meio de coletas, os potenciais não alteraram para as regiões de maior probabilidade de existência do processo de corrosão.

7 TRABALHOS FUTUROS

Ampliar a faixa de estudos na região litorânea do Paraná, criando novas ECA's, em toda a sua extensão, para, assim, adicionar parâmetros de simulação matemática, como rede neural e função dose resposta.

8 REFERÊNCIAS

[1] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C876-91: Standard test of method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. Philadelphia, 1999.

[2] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 1141 – 90: standard specification for substitute ocean water. Philadelphia, 1990, 6p.

[3] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM G 1-90: Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens. 1990.

[4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 14643. Corrosão atmosférica – classificação de corrosividade de atmosferas. Rio de Janeiro, 2001.

[5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 6118: Projeto e execução de obras de concreto armado. São Paulo, 1980.

[6] ABNT NBR 6209: materiais metálicos não revestidos – ensaio não acelerado de corrosão atmosférica. Rio de Janeiro, 1986.

[7] ABNT NBR 6210:preparo, limpeza e avaliação da taxa de corrosão de corpos de prova em ensaios de corrosão atmosférica. Rio de Janeiro, 1982.

[8] ABNT NBR 6211. Determinação de cloretos na atmosfera pelo método da vela úmida. Rio de Janeiro, 2001.

[9] ABNT NBR 6921. Sulfatação total na atmosfera – determinação da taxa pelo método da vela de dióxido de chumbo. Rio de Janeiro, 1981.

[10] BARTON, K. Protection Against Atmospheric Corrosion. Theories and Methods, translation: Jonh R. Duncan, Nottingham University, Ed John Wiley & Sons, 1976.

[11] BIGARELLA J. J., BECKER R. D., MATOS D. J. de, WERNER A. (Ed.) 1978. A Serra do Mar e a porção oriental do Estado do Paraná: Um problema de Segurança ambiental e nacional. Curitiba, Gov. Par./SEPL/ADEA. 249p.

[12] BRAMBILLA, K. J. C., Investigação do grau de corrosividade sobre os materiais metálicos das redes aéreas de distribuição de energia elétrica (RD) da

região metropolitana de Salvador-BA. Curitiba, 2011. Dissertação de Mestrado – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

[13] CASCUDO, O. O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas. 1. ed. São Paulo: PINI, 1997.

[14] CASTAÑO, J. G., BOTERO, C. A., RESTREPO, A. H., AGUDELO, E. A., CORREA, E., ECHEVERRÍA, F.; Atmospheric corrosion of carbon steel in Colombia. Corrosion Science, v. 52, p. 216-223, 2010.

[15] COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALIZACIÓN. EM 206-1: Concrete – Part 1- Specification, performance, production and conformity. Brussels: CEN, 2000.

[16] CORVO, F; MINOTAS, J.; DELGADO, J; ARROYAVE, C. Changes in atmospheric corrosion rate caused by chloride ions depending on rain regime. Corrosion Science, v.47, p. 883-892, 2005.

[17] COSTA, E. A. L. Determinação do Potencial de Agressão dos Sais Marinhos Sobre as Argamassas de Revestimento na Região Metropolitana de Salvador. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2001.

[18] DONG, J.; HAN, E.; KE, H. Introduction to atmospheric corrosion research in China. Science and Technology of advanced materials, v.8, p. 559-565, 2007.

[19] FELIÚ, S.; MORCILLO, M.; Corrosión y protección de los metales en la atmósfera. Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas. Ediciones Bellaterra S. A.: Madrid, 1982, 246 p.

[20] FELIU, S.; MORCILLO, M.; FELIU, S. JR.. The prediction of atmospheric corrosion from meteorological and pollution parameters-II. Long-term forecasts. Corrosion Science, V. 34, p. 415-422, 1993.

[21] GENTIL, V.; Corrosão. 4ª ed., LTC-Livros Técnicos e Científicos S.A.: Rio de Janeiro, 2003, 341 p.

[22] INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION. ISO 9223: Corrosion of metal and alloys, classification of corrosivity of atmospheres. Geneva, 1992.

[23] INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION. ISO 9224: corrosion of metal and alloys – guiding values for the corrosivity categories. Genebra, 1992, 5 p.

[24] INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION. ISO 9226: corrosion of metal and alloys - corrosivity of atmospheres - determination of corrosion rate of standard specimens for the evaluation of corrosivity. Genebra, 1992, 4 p.

[25] IPARDES – INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. 1990. Macrozoneamento da APA de Guaraqueçaba. Curitiba, IPARDES, 2 v., 107 p.

[26] JOUKOSKI, A. Aplicação da técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica para detecção e monitoramento da corrosão em armaduras metálicas inseridas em concreto. Curitiba, 2001. Monografia (Especialização) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

[27] JOUKOSKI, A. Estudo do desempenho de concretos para artefatos de redes de distribuição de energia elétrica destinadas a ambientes litorâneo. Curitiba, 2003. Dissertação de Mestrado – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

[28] J-ATTWOOD, S. C. J. Corrosion and coatings. Journal of the Oil and Colour Chemist's Association, v. 75, n. 4, p. 128-137, 1992.

[29] KATAYAMA, H.; NODA, K.; MASUDA, H; NAGASAWA, M.; ITAGAKI, M.; WATANABE, K. Corrosion simulation of carbon steels in atmospheric environment. Corrosion Science, v. 47, p. 2599-2606, 2005.

[30] KENNY, E. D. Avaliação do impacto da poluição ambiental no processo de corrosão atmosférica de metais através de redes neurais artificiais. Curitiba, 2009. Tese de Doutorado - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

[31] KENNY, E. D.; PORTELA, K. F.; SILVA, J. M.; D'ALKAINE, C. V.; Exposição de materiais metálicos em atmosferas no Paraná – parte I – dois anos de experiência. XVII Congresso Brasileiro de Corrosão – ABRACO, Anais de congresso, T-48, p. 471-483, 1993.

[32] LAN, T. T. N., THOA, N. T. P., NISHIMURA, R., TSUJINO, Y., YOKOI, M., MAEDA, Y.; Atmospheric corrosion of carbon steel under field exposure in the southern part of Vietnam. *Corrosion Science*, v. 48, p. 179-192, 2006.

[33] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Estrutura, propriedades e materiais*. 1 ed. São Paulo: PINI, 1994. 573p.

[34] MORAES, A.C.R., *Contribuições para a gestão da zona costeira do Brasil: elementos para uma geografia do litoral brasileiro*, Ed. Annablume, São Paulo, 2007.

[35] MENDOZA, A. R.; CORVO, F. Outdoor and indoor atmospheric corrosion of non-ferrous metals. *Corrosion Science*, V. 42, p. 1123-1147, 2000.

[36] MORALES, J., MARTÍN-KRIJER, S., DIAZ, F., HERNÁNDEZ-BORGES, J., GONZÁLEZ, S.; Atmospheric corrosion in subtropical areas: influences of time of wetness and deficiency of the ISO 9223 norm. *Corrosion Science*, V. 47, p. 2005-2019, 2005.

[37] MORCILLO, M.; CHICO, B.; MARIACA, L.; OTERO, E. Salinity in marine atmospheric corrosion: its dependence on the wind regime existing in the site. *Corrosion Science*, v. 42, p. 91-104, 2000.

[38] MUEHE, D. *Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006.

[39] NATESAN, M; VENKATACHARI, G.; PALANISWAMY, N. Kinetics of atmospheric corrosion of mild steel, zinc, galvanized iron and aluminium at 10 exposure stations in India. *Corrosion Science*, v. 48, p. 3584-3608, 2006.

[40] NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto*. 2ª Ed. São Paulo. PINI, 1997. 828 p.

[41] NUNEZ, L.; REGUERA, E.; CORVO, F.; GONZALEZ, E.; VAZQUEZ, C. Corrosion of copper in seawater and its aerosols in a tropical island. *Corrosion Science*, v.47, p.461-484, 2005.

[42] OLIVEIRA, A. S. *Interações entre sistemas frontais na América do Sul e convecção na Amazônia*. São José dos Campos. 139p. (INPE-4008-TDL/239). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1986.

[43] OLIVEIRA, E., BACH, V., NOERNBERG, M., DOURADO, M.; Variação anual e sazonal de parâmetros meteorológicos no litoral do Paraná. In: IX Simpósio sobre Ondas, Marés, Engenharia Oceânica e Oceanográfica por Satélite – OMAR-SAT, 2011.

[44] PORTELLA, K. F.; LACERDA, L. A. de; CAMARGOS, J. V. de; Pesquisa e desenvolvimento de metodologias para estudo de corrosão em usinas termelétricas a diesel/gás. Relatório Técnico LACTEC 19742, ELETRONORTE/ANEEL, 60 2006

[45] PORTELLA, K. F.; Mapeamento ambiental para a determinação do grau de corrosividade e de degradação de materiais das redes de distribuição de energia elétrica com soluções corretivas. Relatório Técnico, Projeto ANEEL, P&D 0047-022/2007, 2011.

[46] POURBAIX, M. International cooperation in the prevention of corrosion of materials. In: IX International Congress of metallic Corrosion. Florença, Itália. Anais. 1990.

[47] RODRÍGUEZ, J. J. S.; HERNÁNDEZ, F. X. S.; GONZÁLEZ, J. E. G. The effect of environmental and meteorological variables on atmospheric corrosion of carbon steel, cooper, zinc and aluminium in a limited geographic zone with different types of environment. Corrosion Science (In Press), V. 44, p. 0-0, 2002.

[48] RODRÍGUEZ, J. J. S.; HERNÁNDEZ, F. J. S.; GONZÁLEZ, J. E. G. XRD and SEM studies of the layer of corrosion products for carbon steel in various different environvment in the province of Las Palmas (The Canary Islands, Spain). Corrosion Science, V. 44, p. 2425-2438, 2002.

[49] SICA, C. Y.; Mapeamento da corrosividade atmosférica de São Luiz – MA e a correlação das variáveis ambientais que influenciaram na degradação dos materiais metálicos. Curitiba 2006. 128 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná.

[50] SILVA, J.M.; PORTELLA, K.F.; DALLEDONE, E.; D’ALKAINE, C.V. Exposição de materiais metálicos em estações atmosféricas no Paraná. Parte I – Dois anos de experiência. In: Congresso Iberoamericano de corrosão e proteção, v. 1, n. 3, Rio de Janeiro: p.471, 1989.

- [51] SIMIELLI, M. E. Geoatlas. 30^a ed., Editora Ática, São Paulo, 2000, p. 136.
- [52] UHLIG, H. H. Corrosion y control de corrosion. Bilbao: Urmo, 1975. p. 393.
- [53] VERA, R., DELGADO, D., ROSALES, B. M.; Effect of unusually elevated SO₂ atmospheric content on the corrosion of high power electrical conductors – Part 3. Pure copper. Corrosion Science, v. 50, p. 1080-1098, 2008.
- [54] VERGÉS, G. R.; Estudo do desempenho de sistemas de pintura para materiais das redes de distribuição de energia elétrica situadas em regiões litorâneas. Curitiba, 2005. 213 p. Dissertação (mestrado) – PIPE, Universidade Federal do Paraná.
- [55] VIANA R. O.; O programa de corrosão atmosférica desenvolvido pelo CENPES. Boletim técnico PETROBRAS, V. 23, n. 1, p. 39-47, 1980.
- [56] VILASBOAS, J. M. L. Durabilidade das Edificações de Concreto Armado em Salvador: Uma Contribuição para a Implantação da NBR 6118:2003. Dissertação (Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologia Ambiental no Processo Produtivo) – Escola Politécnica. Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2004.
- [57] YUANTAI, M., YING, L.; FUHUI, W. The atmospheric corrosion kinetics of low carbon steel in a tropical marine environment. Corrosion Science, v.52, p.1796 – 1800, 2010.